

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1518

**ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
“ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ” ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ**

**Recording of laboratory equipment “transportation
and distribution of electric energy” and creation of
laboratorial exercises**

Κρίστο Γιώργο

**Εποπτεύων Καθηγητής:
Σχοινιάς Νικόλαος**

ΠΑΤΡΑ 2015

©2015 - All rights reserved
©2015, Copyright υπό Κρίστο Γιώργο

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ'όλα τους γονείς μου για την ανεκτίμητη και αδιάκοπη υποστήριξη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια και την προσπάθεια που κατέλαβαν για να με βοηθήσουν οικονομικά στο να βγάλω εις πέρας αυτή τη σχολή. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Σχοινά Νικόλαο για την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση καθώς επίσης και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα, την Πανεπιστημιακή Υπότροφη κα. Μέντη Ανθούλα για την βοήθεια που μου πρόσφερε όσον αφορά τις ιδιαιτερότητες των εργαστηριακών πάγκων, καθώς επίσης και όλους του καθηγητές του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2014-2015, στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τεχνολογικής Εκπαίδευσης του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας. Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ή Σ.Η.Ε.), αποτελούν ένα από τα πλέον βασικά μαθήματα της ειδικότητας του ενεργειακού ηλεκτρολόγου μηχανικού. Ως Σ.Η.Ε. ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού, των μέσων και γενικότερα όλων των υποδομών, που απαιτούνται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών διεσπαρμένων γεωγραφικά σε ηλεκτρική ενέργεια, σε τοπικό, σε εθνικό ή ακόμα και σε διεθνές επίπεδο.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να διακριθούν στα ακόλουθα τμήματα:

1. Στους σταθμούς (κέντρα) παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Στα δίκτυα μεταφοράς, που διασυνδέουν τους σταθμούς παραγωγής μεταξύ τους και μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες ποσότητες και αποστάσεις, στα κέντρα κατανάλωσης.
3. Στα δίκτυα διανομής, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Το μεγάλο μέγεθος και η πολυπλοκότητα της δομής των σύγχρονων Σ.Η.Ε., λαμβάνοντας υπόψη φυσικά και τα γενικότερα θέματα ενέργειας και περιβάλλοντος, απαιτούν ουσιαστική γνώση τόσο της στατικής όσο και της δυναμικής συμπεριφοράς τους για την εξασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης από λειτουργική και οικονομική σκοπιά. Στην κατεύθυνση αυτή συμβάλει και η ραγδαία εξέλιξη της ηλεκτρονικής και των υπολογιστικών συστημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης αποδοτικότερων συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η δημιουργία των εργαστηριακών ασκήσεων, επιβλέπει στο να καλύψει το εργαστηριακό μέρος του μαθήματος « ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ » που διδάσκεται στο Ζ' εξάμηνο του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Α.Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά την καταγραφή του εξοπλισμού του εργαστηρίου και τη δημιουργία των εργαστηριακών ασκήσεων. Το εργαστηριακό φυλλάδιο θα περιλαμβάνει πέντε ασκήσεις οι οποίες θα συνοδεύονται από τα όργανα, τις συσκευές, τα υλικά και τις μετρητικές διατάξεις που χρειάζεται κάθε άσκηση για να περατωθεί, καθώς επίσης και την κατάλληλη θεωρία (η οποία θα τροποποιηθεί και θα είναι πιο βελτιωμένη από την υπάρχουσα) με την ανάλυση των βασικών εννοιών και των φαινομένων, που σχετίζονται με την κατανόηση της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή, θα περιλαμβάνει τις κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις, τα απαραίτητα σχήματα, την πειραματική διαδικασία, τους πίνακες μετρήσεων και στο τέλος θα περιλαμβάνει ασκήσεις και προβλήματα για εξάσκηση στο σπίτι, όπου αυτές θεωρούνται απαραίτητες. Πιο συγκεκριμένα, κατά την μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται διάφορα φαινόμενα υπό κάποιες προϋποθέσεις και από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των γραμμών μεταφοράς, όπως ασύμμετρη φόρτιση των μετασχηματιστών, υπερβολική άεργος ισχύ, διακυμάνσεις στις τιμές της επιθυμητής τάσης, φαινόμενο Ferranti και πτώσεις τάσης στις γραμμές του δικτύου. Όλα αυτά, πρέπει να ληφθούν υπόψη για να έχουμε καλύτερη εξυπηρέτηση, αποδοτικότερη λειτουργία και σαφώς αξιοπιστία.

Σκοπός λοιπόν αυτών των ασκήσεων είναι, ο σπουδαστής να μπορέσει να παρατηρήσει, να κατανοήσει και να αφομοιώσει καλύτερα τις παραπάνω λειτουργικές συμπεριφορές των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Εισαγωγή.....	1
Γενικά για τις γραμμές μεταφοράς - Μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς.....	1
Άσκηση 1	3
Αντιστάθμιση ισχύος με πυκνωτές.....	3
Αντικείμενο της άσκησης:.....	3
α) Ρύθμιση της τάσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς με χρήση πυκνωτών.	4
β) Παρατήρηση της φασικής γωνίας μεταξύ της τάσης αναχώρησης και της τάσης άφιξης της γραμμής.	5
γ) Παρατήρηση της φασικής πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής όταν οι τάσεις στα δύο άκρα της έχουν ίσα μέτρα.	6
Όργανα-συσκευές-υλικά:	8
Πειραματική διαδικασία:.....	8
Άσκηση 2	11
Φαινόμενο Ferranti.....	11
Συμπεριφορά αφόρτιστων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους και η παρουσίαση του φαινομένου Ferranti.....	11
Όργανα-συσκευές-υλικά:	15
Πειραματική διαδικασία:.....	16
Άσκηση 3	18
Ασύμμετρη φόρτιση τριφασικού μετασχηματιστή	18
Μελέτη συμπεριφοράς τριφασικού μετασχηματιστή όταν αυτός φορτίζεται ασύμμετρα.	18
Όργανα-συσκευές-υλικά:	24
Πειραματική διαδικασία:.....	24
Άσκηση 4	27
Ρύθμιση τάσης στο τέλος της γραμμής με σύγχρονη μηχανή.....	27
Αντικείμενο της άσκησης:.....	27
α) Παρουσίαση της δυνατότητας του σύγχρονου πυκνωτή για ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους ανάλογα με τη φόρτιση της γραμμής.	28
β) Παραλληλισμός σύγχρονης μηχανής με το δίκτυο.	28
γ) Ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης (I_f) της μηχανής και αντιστάθμιση του φορτίου.	29
Όργανα-συσκευές-υλικά:	31

Πειραματική διαδικασία:.....	31
Άσκηση 5	34
Εναέρια τριφασική γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης 220 KV	34
Γραμμή μεταφοράς 200 km με μικρό και μεγάλο φορτίο RL με ρύθμιση τάσης και παρατήρηση φαινομένου Ferranti.....	34
Όργανα-συσσκευές-υλικά:	37
Πειραματική διαδικασία:.....	37
Άσκηση 6	38
Τριφασική γραμμή διανομής 20 KV	38
Περιγραφή του πάνελ του εργαστηρίου, η εύρεση του δυσμενέστερου καταναλωτή και η εύρεση της τάσης στα άκρα του.....	38
Περιγραφή του εξομοιωτή:	39
Όργανα-συσσκευές-υλικά:	41
Πειραματική διαδικασία:.....	42
Βιβλιογραφία.....	43

Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η αύξηση του επιπέδου διαβίωσης, σχετίζεται άμεσα από την καταναλισκόμενη ενέργεια. Η ανθρωπότητα δαπανά καθημερινά για τις διάφορες δραστηριότητες, τεράστια ποσά ενέργειας. Ανάλογα με το σκοπό που χρησιμοποιείτε η ηλεκτρική ενέργεια, οι καταναλωτές μπορούν να κατανεμηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

1. Οικιακοί καταναλωτές.
2. Εμπορικοί καταναλωτές.
3. Βιομηχανικοί καταναλωτές.

Οι καταναλωτές αυτοί, όπως και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν βρίσκονται στον ίδιο γεωγραφικό τόπο και ούτε τους χωρίζουν μικρές αποστάσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταφορά της ενέργειας ακριβώς εκεί που βρίσκεται ο καταναλωτής. Αυτό δεν είναι τόσο εύκολο όσο ακούγεται καθώς καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε τα διάφορα εμπόδια και προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την τροφοδότηση των παραπάνω καταναλωτών. Όπως λόγου χάρη υπερφόρτιση της γραμμής με άεργο ισχύ λόγο επαγωγικών φορτίων, πτώση τάσης στις γραμμές μεταφοράς, ασύμμετρη φόρτιση των μετασχηματιστών ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης καθώς κάθε φάση δεν μεταφέρει την ίδια ισχύ με τις υπόλοιπες, λόγο ασύμμετρων φορτίων. Επίσης, λόγω των χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς και υπό κάποιες προϋποθέσεις παρουσιάζετε το φαινόμενο Ferranti το οποίο θα εξηγήσουμε στη συνέχεια. Όλα αυτά λοιπόν είμαστε υποχρεωμένοι να τα λάβουμε υπόψη. Με τη βοήθεια εξομοιωτών (μοντέλων) στο εργαστήριο θα δούμε και θα καταλάβουμε αυτές τις συμπεριφορές.

Συνοπτικά, το εργαστηριακό φυλλάδιο θα περιλαμβάνει: Μία άσκηση αντιστάθμισης ισχύος με πυκνωτές, μία άσκηση με το φαινόμενο Ferranti, μία άσκηση με τριφασικό μετασχηματιστή, μία άσκηση με σύγχρονη μηχανή, μία άσκηση με τριφασική γραμμή μεταφοράς και μία άσκηση με τριφασική γραμμή διανομής.

Άσκηση 1: Αντιστάθμιση ισχύος με πυκνωτές.

Άσκηση 2: Φαινόμενο Ferranti.

Άσκηση 3: Ασύμμετρη φόρτιση τριφασικού μετασχηματιστή.

Άσκηση 4: Ρύθμιση τάσης στο τέλος της γραμμής με σύγχρονη μηχανή.

Άσκηση 5: Εναέρια τριφασική γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης 220 KV.

Άσκηση 6: Τριφασική γραμμή διανομής 20 KV.

Γενικά για τις γραμμές μεταφοράς - Μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς.

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλου μήκους, είναι η ωμική αντίσταση (resistance), η αυτεπαγωγή (inductance), η χωρητικότητα (capacitance) και η εγκάρσια αγωγιμότητα (conductance).

Το μήκος μιας γραμμής μεταφοράς, αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για τη μοντελοποίηση της και αυτό οφείλεται στις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούμε σε κάθε περίπτωση, όσον αφορά στη θεώρηση των παραμέτρων της γραμμής.

Βασική προϋπόθεση για τη μοντελοποίηση μιας γραμμής μεταφοράς μέσω ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος, είναι η ύπαρξη πλήρους τριφασικής συμμετρίας, όχι μόνο στις γραμμές, αλλά και στις πηγές τροφοδοσίας τους, καθώς επίσης και στα φορτία που τροφοδοτούν.

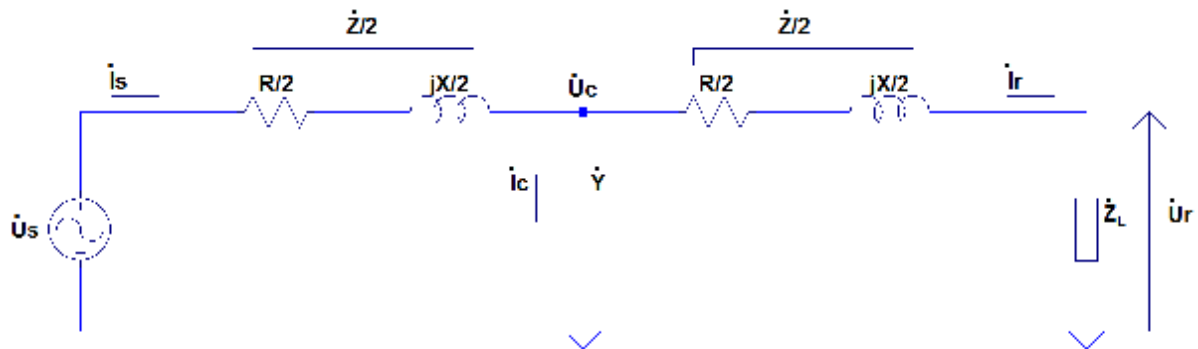
Για την κυκλωματική τους παράσταση, οι εναέριες γραμμές μεταφοράς διακρίνονται ανάλογα με το μήκος στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Ø Μικρού μήκους (short-length lines)
- Ø Μεσαίου μήκους (medium-length lines)
- Ø Μεγάλου μήκους (long-length lines)

Στις γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους, κατατάσσονται οι εναέριες γραμμές με μήκος μικρότερο των 80 km, στην κατηγορία των γραμμών μεταφοράς μεσαίου μήκους, οι γραμμές με μήκος από 80 km έως 240 km περίπου και πάνω από τα 240 km στις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους.

Για την επίλυση μιας γραμμής μεταφοράς χρησιμοποιούμε το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα και τις εξισώσεις που το διέπουν. Υπάρχουν δύο μονοφασικά ισοδύναμα κυκλώματα, το ισοδύναμο 'T' και το ισοδύναμο 'Π'.

Ισοδύναμο 'T':



Εξισώσεις ισοδύναμου 'T':

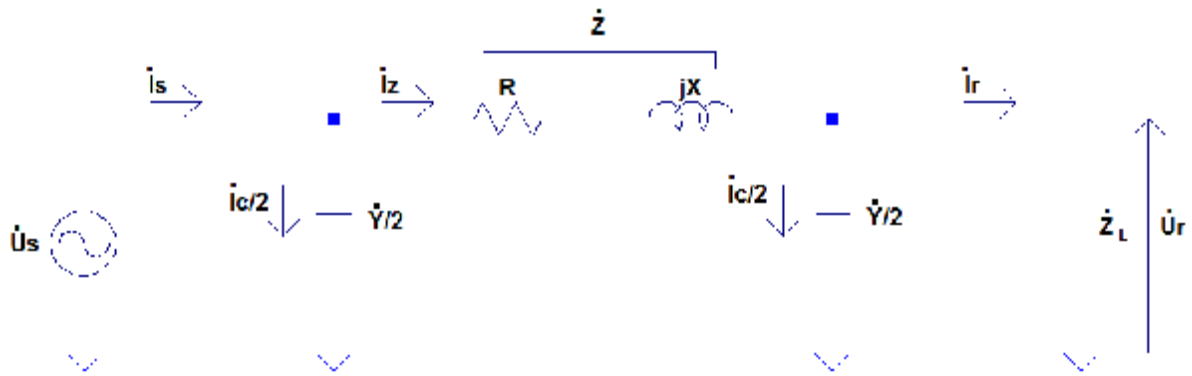
$$\dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{U}_r + \dot{Z} \left(1 + \frac{1}{4} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{Y}\dot{U}_r + \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{I}_r$$

$$\dot{U}_s = \dot{A}\dot{U}_r + \dot{B}\dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{C}\dot{U}_r + \dot{D}\dot{I}_r$$

Ισοδύναμο 'Π':



Εξισώσεις ισοδύναμου 'Π':

$$\dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{U}_r + \dot{Z}\dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{Y} \left(1 + \frac{1}{4} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{U}_r + \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{I}_r$$

$$\dot{U}_s = \dot{A}\dot{U}_r + \dot{B}\dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{C}\dot{U}_r + \dot{D}\dot{I}_r$$

Όπου:

\dot{U}_s : είναι η φασική τάση αναχώρησης της γραμμής, στην αρχή της γραμμής, το s είναι από το send που σημαίνει στέλνω.

\dot{U}_r : είναι η φασική τάση άφιξης της γραμμής, στο τέλος της γραμμής, το r είναι από το receive που σημαίνει λαμβάνω.

\dot{I}_s : είναι το ρεύμα αναχώρησης της γραμμής, στην αρχή της γραμμής.

\dot{I}_r : είναι το ρεύμα άφιξης της γραμμής, στο τέλος της γραμμής.

\dot{Z} : $R + jX_L = R + j\omega L$

\dot{Y} : $\frac{1}{-jX_C} = j\omega C$

Με $\dot{U}_{s,\pi}$ και με $\dot{U}_{r,\pi}$ συμβολίζονται (π : πολική τιμή) οι πολικές τιμές.

Άσκηση 1

Αντιστάθμιση ισχύος με πυκνωτές

Αντικείμενο της άσκησης:

α) Ρύθμιση της τάσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς με χρήση πυκνωτών.

β) Παρατήρηση της φασικής γωνίας μεταξύ της τάσης αναχώρησης και της τάσης άφιξης της γραμμής.

γ) Παρατήρηση της φασικής πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής όταν οι τάσεις στα δύο άκρα της έχουν ίσα μέτρα.

α) Ρύθμιση της τάσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς με χρήση πυκνωτών.

Σε μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, παρατηρήσαμε ότι ένα ωμικό ή επαγωγικό ή ακόμα και ο συνδυασμός αυτών των δύο ωμικό-επαγωγικό φορτίο στο τέλος μιας γραμμής μεταφοράς, έχει σαν αποτέλεσμα μια μεγάλη πτώση τάσης, που μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη. Αντίθετα όμως, η σύνδεση στατών πυκνωτών στο τέλος της γραμμής, έχουν σαν αποτέλεσμα την ανύψωση της τάσης. Έτσι, μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα:

3Φ R Φορτίο	$U_r \downarrow$
3Φ L Φορτίο	$U_r \downarrow\downarrow$
3Φ RL Φορτίο	$U_r \downarrow\downarrow\downarrow$
3Φ C Φορτίο	$U_r \uparrow\uparrow\uparrow$

Αυτή η πτώση τάσης δεν είναι επιθυμητή καθώς όπως ξέρουμε οι ηλεκτρικές συσκευές εργάζονται αξιόπιστα μόνο κάτω από συνθήκες σταθερής ονομαστικής τάσης. Επομένως, η τάση στο τέλος μιας γραμμής μεταφοράς πρέπει να ρυθμίζεται, έτσι ώστε να παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα, ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης της γραμμής.

- Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ρύθμισης της τάσης:

- (1) Μετασχηματιστές (ΜΣ)
- (2) Συστοιχία στατών πυκνωτών
- (3) Σύγχρονος κινητήρας (Σύγχρονος πυκνωτής)

- Στο εργαστήριο αυτό θα εξεταστούν οι μέθοδοι (2) και (3).

- Η μέθοδος (1) εφαρμόζεται μέσω του ΜΣ 20/0.4 KV:

- Ø Η ρύθμιση γίνεται μια φορά κατά την εγκατάσταση του ΜΣ.
- Ø Η τάση στην αναχώρηση του δικτύου XT επιλέγεται μεγαλύτερη από 230 V. Σε άλλα σημεία του δικτύου είναι χαμηλότερη.

- Ø Η μέγιστη και η ελάχιστη τάση που παρέχει η Επιχείρηση Ηλεκτρισμού στους καταναλωτές πρέπει να είναι σύμφωνες με τη μέγιστη διακύμανση που επιτρέπουν οι κανονισμοί.

Ένας τρόπος ρύθμισης της τάσης στο τέλος μιας γραμμής μεταφοράς, που έχει καλά αποτελέσματα, είναι η σύνδεση στατών αντισταθμιστών αέργου ισχύος. Οι στατοί πυκνωτές σε σύγκριση με τους σύγχρονους πυκνωτές, είναι πιο φθηνοί και παρουσιάζουν χαμηλότερες απώλειες. Πέραν αυτών όμως, έχουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως, η μεταβολή της παρεχόμενης χωρητικής άεργης ισχύος είναι διακριτή. Επίσης, σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης του ζυγού λόγω έντονης επαγωγικής φόρτισης, η προσφερόμενη από αυτούς χωρητική άεργη ισχύς, μειώνεται σημαντικά, καθώς ισχύει $Q_C = \frac{V^2}{X_C}$. Οι στατοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Ø Πυκνωτές (3Φ συστοιχίες πυκνωτών) με μηχανικούς διακόπτες. (Αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Μπορούν να συνδέονται και να αποσυνδέονται μόνο μερικές φορές την ημέρα.)
- Ø Πυκνωτές (3Φ συστοιχίες πυκνωτών) με ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος.

Η ελαχιστοποίηση της ροής της άεργης ισχύος διαμέσου των γραμμών μεταφοράς, εκτός από τη μείωση των διακυμάνσεων στο μέγεθος της τάσης υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, συμβάλλει στη μείωση των απωλειών στις διαμήκεις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς, στη μείωση της διαστασιολόγησης διαφόρων συσκευών (όπως μετασχηματιστές, διακόπτες φορτίου κ.λ.π.) που παρεμβάλλονται στο δίκτυο, στην αύξηση της δυνατότητας μεταφοράς περιορίζοντας την ανάγκη για νέες γραμμές, καθώς επίσης και στη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος.

Αν η γραμμή μεταφοράς τροφοδοτεί καθαρά επαγωγικό συμμετρικό φορτίο, αρκεί να συνδεθούν πυκνωτές που να παράγουν άεργο ισχύ ίση με αυτή που απορροφά το επαγωγικό φορτίο. Το αποτέλεσμα είναι ένας παράλληλος συντονισμός, όπου η άεργη ισχύς που απορροφούν οι επαγωγές, παράγεται εξολοκλήρου από τις χωρητικότητες των στατών πυκνωτών και έτσι δε μεταφέρεται άεργη ισχύς από τη γραμμή μεταφοράς.

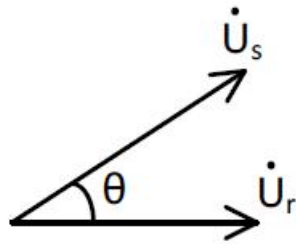
Αν η γραμμή τροφοδοτεί καθαρά ωμικό συμμετρικό φορτίο, η άεργος ισχύς που πρέπει να παράγουν οι πυκνωτές για να ρυθμίσουν την τάση υπολογίζεται πιο δύσκολα. Στην παρούσα άσκηση θα προσδιορίσουμε αυτή την άεργη ισχύ με δοκιμές, έτσι ώστε η τάση στο τέλος της γραμμής να γίνει ίση με την τάση στην αρχή.

Στην πράξη όμως, τα φορτία ως επί των πλείστων είναι ωμικά-επαγωγικά (R,L), δηλαδή απορροφούν πραγματική και άεργη ισχύ. Και στη περίπτωση αυτή η ρύθμιση της τάσης στο τέλος της γραμμής μεταφοράς γίνεται με χρήση στατών πυκνωτών.

β) Παρατήρηση της φασικής γωνίας μεταξύ της τάσης αναχώρησης και της τάσης άφιξης της γραμμής.

Στην άσκηση αυτή θα χρησιμοποιήσουμε για πρώτη φορά το μετρητή φασικής γωνίας H-PAM-150. Με το όργανο αυτό μπορούμε να μετρήσουμε τη γωνία μεταξύ των παραστατικών μιγάδων των τάσεων $\dot{U}_{s,\pi}$, $\dot{U}_{r,\pi}$.

Η γωνία αυτή λέγεται **φασική γωνία** ή **γωνία ισχύος**. Για τη μέτρηση της φασικής γωνίας, σαν τάση αναφοράς στο μιγαδικό επίπεδο εκλέγεται η φασική τάση άφιξης \dot{U}_r της γραμμής μεταφοράς και τοποθετείται πάντα στον οριζόντιο άξονα με γωνία 0° .



Σχήμα 1.1

Επομένως οι μιγαδικές αναπαραστάσεις της τάσης αναχώρησης και της τάσης άφιξης της γραμμής είναι $\dot{U}_{s,\pi} = U_s \angle \theta$ και $\dot{U}_{r,\pi} = U_r \angle \theta$ αντίστοιχα.

γ) Παρατήρηση της φασικής πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής όταν οι τάσεις στα δύο άκρα της έχουν ίσα μέτρα.

Η φασική μιγαδική πτώση τάσης είναι:

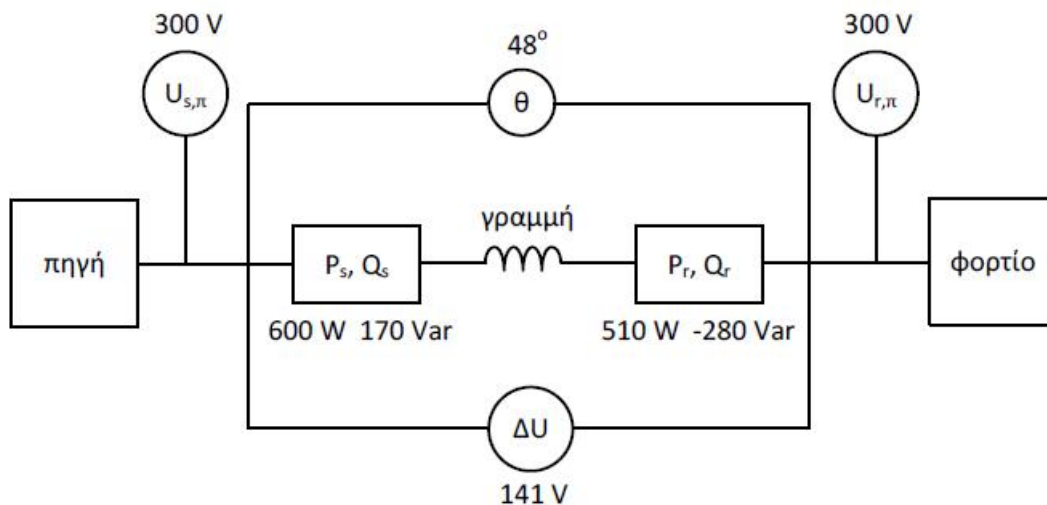
$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_s - \dot{U}_r = \frac{\dot{U}_{s,\pi}}{\sqrt{3}} - \frac{\dot{U}_{r,\pi}}{\sqrt{3}}$$

Κατά την πειραματική διαδικασία, θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει μια σημαντική πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, ακόμη και όταν οι τάσεις $\dot{U}_{s,\pi}$ και $\dot{U}_{r,\pi}$ στα δύο άκρα της γραμμής έχουν ίσα μέτρα, δηλαδή όταν:

$$|\dot{U}_{s,\pi}| = |\dot{U}_{r,\pi}|$$

Πώς όμως είναι δυνατόν να έχουμε πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, όταν οι τάσεις και στα δύο άκρα έχουν ίσα μέτρα; Η απάντηση είναι ότι η πτώση τάσης οφείλεται στη φασική γωνία μεταξύ των δύο τάσεων που αναφέραμε πιο πάνω.

Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, κάνουμε μια σύντομη ανάλυση των παρακάτω υποθετικών ενδείξεων των οργάνων. Έστω ότι έχουμε τις παρακάτω ενδείξεις των οργάνων:

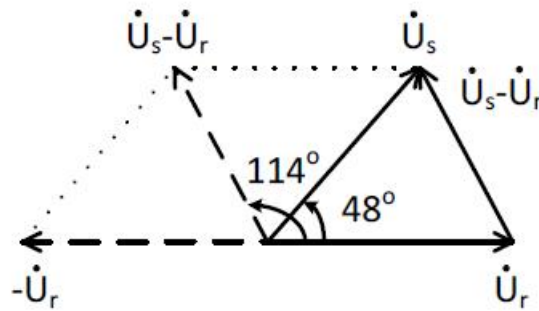


Σχήμα 1.2

Η φασική πτώση τάσης επαληθεύεται ότι είναι:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_s - \dot{U}_r = \frac{300}{\sqrt{3}} \angle 48^\circ - \frac{300}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = \frac{300}{\sqrt{3}} \cos 48^\circ + j \frac{300}{\sqrt{3}} \sin 48^\circ - \frac{300}{\sqrt{3}} = 140.88 \angle 114^\circ \text{ V}$$

Επαληθεύσαμε υπολογιστικά την τιμή των 141V περίπου που μετρήσαμε στο εργαστήριο και παρατηρούμε ότι αυτή η πτώση τάσης οφείλεται στη φασική γωνία των 48° . Στο μιγαδικό διάγραμμα του σχήματος φαίνονται οι φασικές τάσεις αναχώρησης, η φασική πτώση τάσης καθώς και η φασική γωνία.



Σχήμα 1.3

Η ενεργός ισχύς που απορροφά η γραμμή είναι:

$$P_\gamma = 600 - 510 = 90 \text{ W} = 3I^2R$$

$$P_{\gamma(\text{ανά φάση})} = 90/3 \text{ W} = 30 \text{ W} = I^2R$$

Η άεργος ισχύς που απορροφά η γραμμή είναι:

$$Q_\gamma = 170 - (-280) \text{ Var} = 170 + 280 \text{ Var} = 450 \text{ Var} = 3I^2X_L$$

$$Q_{\gamma(\text{ανά φάση})} = 450 / 3 \text{ Var} = 150 \text{ Var} = I^2X_L$$

Τα R , X_L είναι η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής αντίστοιχα σε Ω ανά φάση. Η χωρητικότητα δεν έχει ληφθεί υπόψη.

Η φαινόμενη ισχύς (ανά φάση) που απορροφά η γραμμή είναι:

$$S_{\gamma(\text{ανά φάση})} = \sqrt{30^2 + 150^2} = 153 \text{ VA} = I^2Z$$

Το ρεύμα της γραμμής (ανά φάση) είναι:

$$I_{\gamma(\text{ανά φάση})} = \frac{S_{\gamma(\text{ανά φάση})}}{\Delta U} = \frac{153 \text{ VA}}{141 \text{ V}} = 1.085 \text{ A}$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, δεν χρειάζονται αμπερόμετρα. Αρκούν οι μετρητές ισχύος και τα βολτόμετρα για να βρούμε όλα τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν.

Στη πράξη η φασική γωνία θ διατηρείται μικρή (2° έως 5°), οπότε έχουμε μικρές πτώσεις τάσης. Στο παράδειγμά μας ήταν 48° και γι' αυτό τελικά η πτώση τάσης ήταν υπερβολικά μεγάλη. Η φασική γωνία εξαρτάται από το φορτίο. Γενικά ισχύει:

Φορτίο \uparrow , $\Delta U \uparrow$, $\theta \uparrow$ και αντιστρόφως.

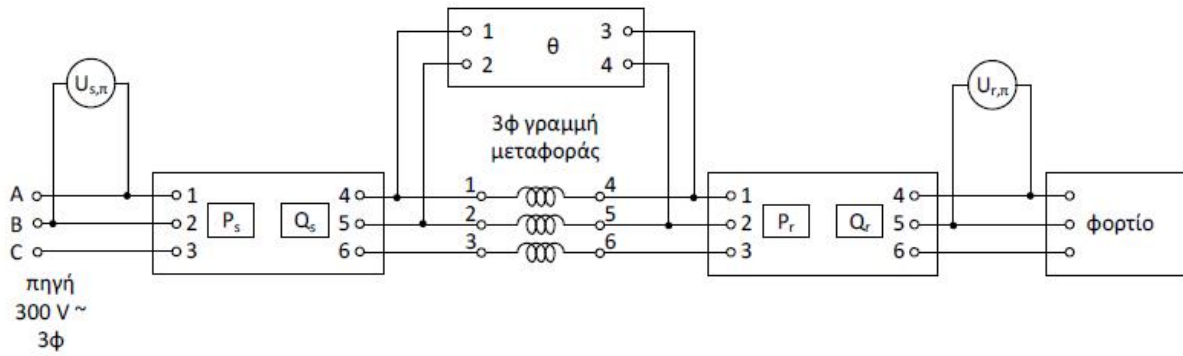
Όργανα-συσκευές-υλικά:

1. Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.
2. Τριφασικός μετρητής Watt-Var-H-W/V-150. (2)
3. Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.
4. Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.
5. Βολτόμετρα AC-VA-150.
6. Μετρητής φασικής γωνίας H-PAM-150.

Πειραματική διαδικασία:



Συνδέουμε το κύκλωμα:

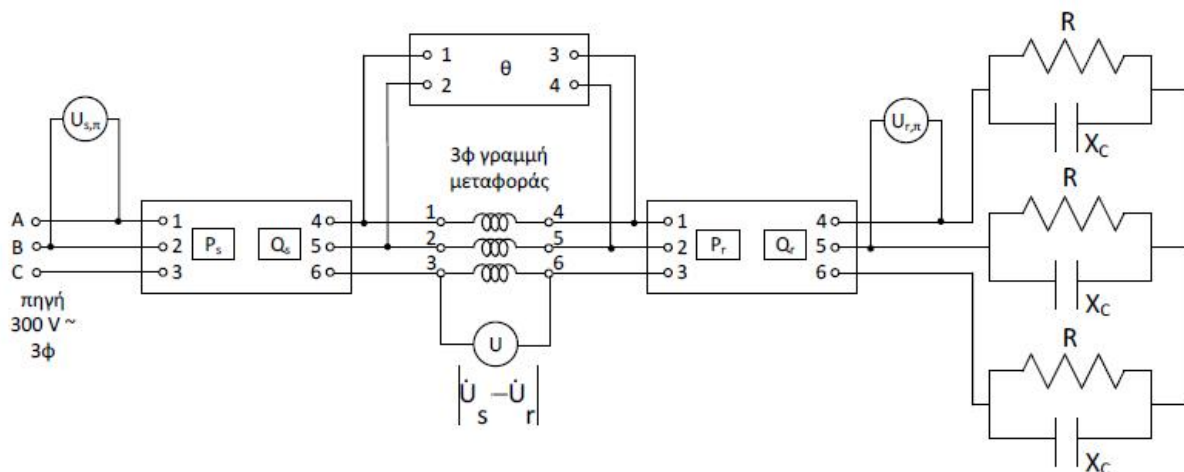


- Επιλέγουμε γραμμή 100 km και ωμικό φορτίο.
- Η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή.
- Αυξάνουμε το ωμικό φορτίο σε βήματα και μετράμε τα μεγέθη του πίνακα 1.1.

Μεταβολή της τάσης με ωμικό φορτίο								
R [Ω] Ανά φάση	$U_{s,\pi}$ [V]	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	θ [°]	$ \Delta U $ [V]
∞								
7000								
3500								
2333.3								
1750								
1400								
1166.6								

Πίνακας 1.1

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία συνδέοντας επιπλέον στατούς πυκνωτές παράλληλα στο φορτίο.



- Με τη βοήθεια των πυκνωτών αυτών ρυθμίζουμε κάθε φορά την τάση $U_{r,π}$ στο φορτίο ώστε να είναι κοντά στην τάση στην αρχή της γραμμής. Πρέπει σε κάθε περίπτωση να διατηρούμε τις φάσεις συμμετρικές. Συμπληρώνουμε τον πίνακα 1.2.
- Μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση του P_r που απορροφάται από το φορτίο όταν συνδέεται παράλληλα πυκνωτής.

Μεταβολή της τάσης με ωμικό φορτίο και στατούς πυκνωτές									
R [Ω] Ανά φάση	X_c [Ω] Ανά φάση	$U_{s,π}$ [V]	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{r,π}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	θ [°]	$ \Delta U $ [V]
∞	-								
7000	-								
3500	-								
2333.3	-								

1750	-								
1400	-								
1166.6	-								

Πίνακας 1.2

· Ζητούνται επίσης:

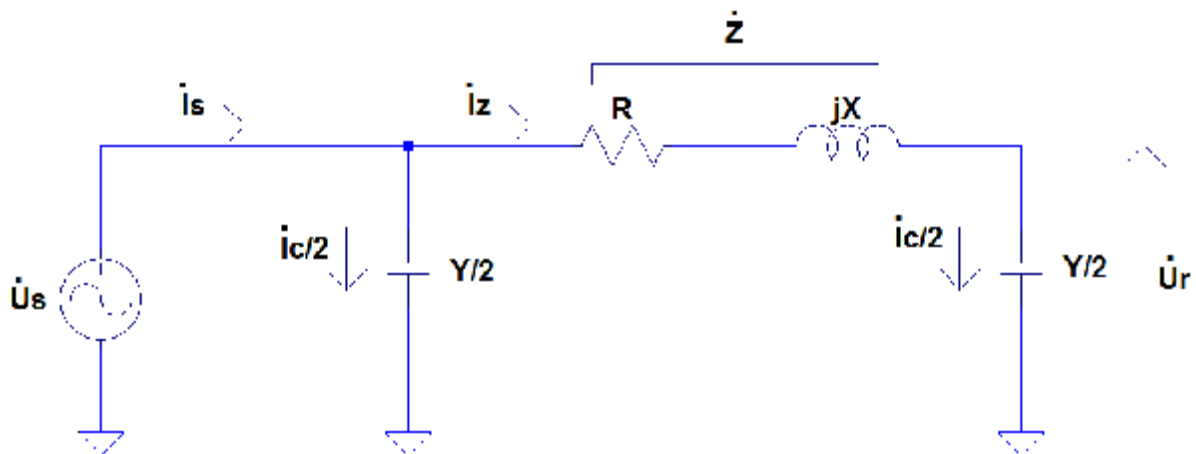
- Ø Να σχεδιαστούν οι $U_{r,\pi} = f(P_r)$ (α) χωρίς πυκνωτή, (β) με πυκνωτή, στο ίδιο διάγραμμα.
- Ø Να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση της τελευταίας γραμμής του πίνακα 1.2. Με τη βοήθεια της θεωρίας να επαληθευτεί η τιμή της φασικής πτώσης τάσης και να υπολογιστούν το ρεύμα της γραμμής ανά φάση, καθώς και η πραγματική και η άεργος ισχύς που απορροφά η γραμμή.

Άσκηση 2

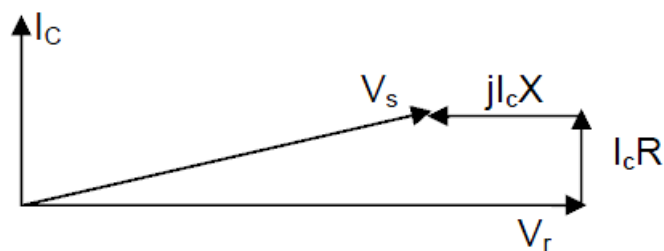
Φαινόμενο Ferranti

Συμπεριφορά αφόρτιστων γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους και η παρουσίαση του φαινομένου Ferranti.

Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους, εκτός από την επαγωγή L έχουν και σημαντική χωρητικότητα C . Οι γραμμές αυτές, όταν λειτουργούν αφόρτιστες, το μόνο ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές μεταφοράς είναι το χωρητικό ρεύμα της γραμμής, που απαιτείται για τη φόρτιση των χωρητικότητων της γραμμής. Στην περίπτωση αυτή, η τάση στο τέλος της γραμμής τείνει να υπερβαίνει την τάση στην αρχή της γραμμής. Η άνοδος της τάσης ορίζεται ως το ποσοστό ανόδου της τάσης στη θέση του φορτίου, με σταθερή την τάση στην αρχή της γραμμής. Χρησιμοποιώντας το 'Π'-ισοδύναμο της γραμμής και το διανυσματικό διάγραμμα του είναι εύκολο να διαπιστωθεί η αύξηση της τάσης στο ανοικτό άκρο της γραμμής.



Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.2

Οι εγκάρσιες χωρητικότητες βρίσκονται στην αρχή και στο τέλος της γραμμής και τα ρεύματα που τις διαρρέουν εξαρτώνται από την τάση αναχωρήσεως και την τάση αφίξεως. Το ρεύμα που διαρρέει την γραμμή εξαιτίας των χωρητικότητων αυτών προπορεύεται της τάσης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανύψωση της τάσης που μεταφέρει η γραμμή. Οι εγκάρσιες χωρητικότητες στην αρχή και στο τέλος της γραμμής παράγουν άεργη ισχύ μεγαλύτερη από εκείνη που καταναλώνεται από την επαγωγή σειράς. Επομένως σε γραμμές μεγάλου μήκους, όταν λειτουργούν με ανοικτό το ένα άκρο τους, ή με πολύ μικρό φορτίο, παρουσιάζεται ανύψωση της τάσης στο τέλος της γραμμής, αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Ferranti.

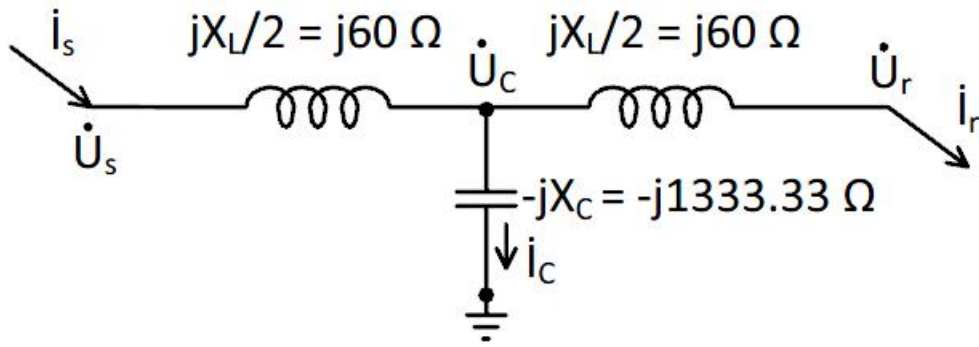
Μια τέτοια γραμμή έχει συνήθως ωμική αντίσταση $R_0 = 0.00\dots \Omega/\text{km}$ ανά φάση επαγωγική αντίσταση (αντίδραση) $X_{L0} = 0.4 \Omega/\text{km}$ ανά φάση και χωρητική αντίσταση (αντίδραση) $X_{C0} = 4 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{km}$ ανά φάση στα 50 Hz.

Έτσι μια γραμμή μεταφοράς 300 km έχει:

- $X_L = 120 \Omega$ ανά φάση
- $X_C = 1333.33 \Omega$ ανά φάση

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης με μεγάλο μήκος, η ωμική αντίσταση ανά φάση της γραμμής είναι πολύ μικρότερη από την επαγωγική αντίδραση ανά φάση ($R \ll X_L$). Έτσι μπορούμε να παραλείψουμε την ωμική αντίσταση ανά φάση της γραμμής, χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα στους υπολογισμούς.

Από το ισοδύναμο 'T' όπου η χωρητικότητα της γραμμής είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο, αντί να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε όλο το μήκος της και από τις εξισώσεις του ισοδύναμου 'T' μπορούμε να καταλάβουμε τι προκαλεί το φαινόμενο Ferranti.



Σχήμα 2.3

Γενικά ισχύουν οι σχέσεις:

$$\dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{U}_r + \dot{Z} \left(1 + \frac{1}{4} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{Y}\dot{U}_r + \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{I}_c$$

Επειδή δεν υπάρχει φορτίο, το $\dot{I}_r = 0$ και επομένως οι σχέσεις αυτές απλοποιούνται ως εξής:

$$\dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) \dot{U}_r \Rightarrow \dot{U}_s = \dot{A}\dot{U}_r$$

$$\dot{I}_s = \dot{Y}\dot{U}_r = \dot{I}_c$$

Ü Άρα βλέπουμε ότι η μιγαδική σταθερά \dot{A} (δηλαδή η επαγωγή και η χωρητικότητα της γραμμής) « ευθύνεται » για το φαινόμενο Ferranti. Το μέτρο της είναι λίγο μικρότερο από το 1 (συνήθως 0.91 έως 0.99).

Το φαινόμενο Ferranti μπορεί να γίνει κατανοητό με τη βοήθεια ενός αριθμητικού παραδείγματος.

Έστω ότι:

$$\dot{U}_s = 300 \text{ kV}$$

$$\dot{Z} = R + jX_L = 0 + j120 = j120 \text{ Ω/φάση}$$

$$\dot{Y} = \frac{1}{-jX_C} = \frac{j}{1333.33} = j0.00075 \text{ S/φάση}$$

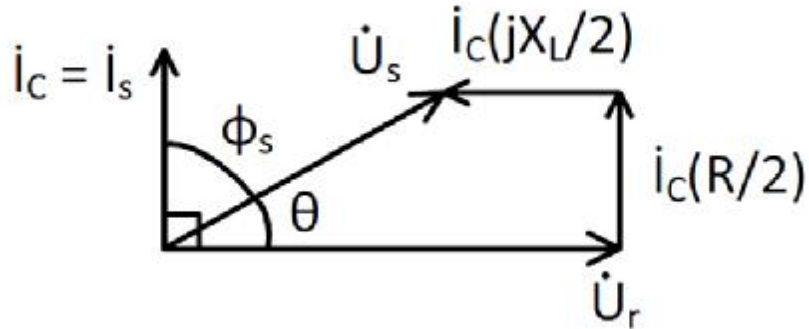
Τότε:

$$\dot{A} = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y}\dot{Z} \right) = 1 + \frac{1}{2} j0.00075 \cdot j120 = 1 + (-0.045) = 1 - 0.045 = 0.955$$

$$\dot{U}_s = \dot{A}\dot{U}_r = 0.955 \cdot \dot{U}_r \Rightarrow \dot{U}_r = \frac{300 \text{ kV}}{0.955} = 314.136 \text{ kV}$$

Από το παράδειγμα βλέπουμε ότι η τάση \dot{U}_r είναι μεγαλύτερη από την τάση \dot{U}_s κατά 14.136 KV.

Μετά την εμφάνιση του φαινομένου Ferranti, στο σχήμα 2.4 βλέπουμε το μιγαδικό διάγραμμα των τάσεων και των εντάσεων της γραμμής μεταφοράς, η οποία περιλαμβάνει και μια μικρή ωμική αντίσταση R ανά φάση.

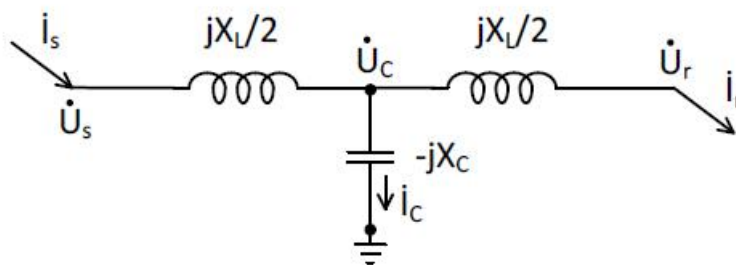


Σχήμα 2.4

Το \dot{I}_s είναι κάθετο στο \dot{U}_r , γιατί το $\dot{I}_r = 0 \Rightarrow \dot{U}_r = \dot{U}_c$ και $\dot{I}_s = \dot{I}_c$. Η γωνία μεταξύ \dot{I}_s και \dot{U}_s είναι ϕ_s και η γωνία μεταξύ \dot{U}_s και \dot{U}_r είναι θ . Η γωνία μεταξύ \dot{I}_s και \dot{U}_r είναι $\phi_s + \theta = 90^\circ$.

- Άρα $\phi_s = 90^\circ - \theta$ και ο PF στην αναχώρηση της γραμμής (άκρο s) είναι έντονα χωρητικός.
- Η πτώση τάσης στη γραμμή είναι $\Delta \dot{U} = \dot{I}_c \left(\frac{R+jX_L}{2} \right)$.
- $\dot{U}_r > \dot{U}_s$.

Αποτελέσματα φαινομένου Ferranti:



Σχήμα 2.5

Άκρο S:	Άκρο R:
\dot{U}_s σταθερή	$\dot{U}_r \uparrow$
$\dot{I}_s \downarrow$	$\dot{I}_r = \mathbf{0}$
$\dot{I}_C \uparrow$	$\cos \varphi_r$ δεν υπάρχει
$\dot{I}_s = \dot{I}_C$	
$\cos \varphi_s = \text{έντονα χωρητικό}$	

Δηλαδή αυτό που συμβαίνει κατά το φαινόμενο Ferranti είναι ότι:

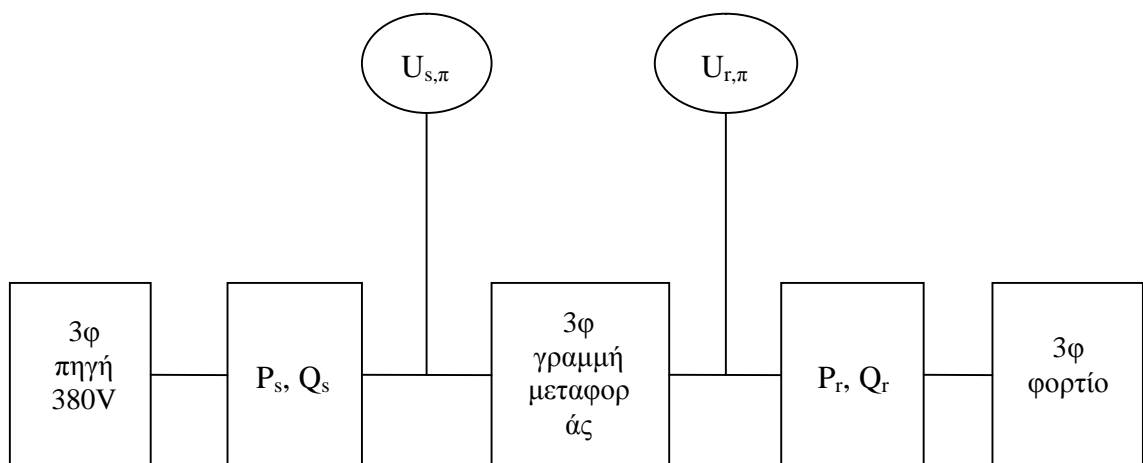
Στην αρχή της γραμμής (άκρο S) το \dot{I}_s μειώνεται, το \dot{I}_C αυξάνεται και γίνονται τα ίδια, επίσης, το $\cos \varphi_s$ γίνεται έντονα χωρητικό. Από την άλλη όμως, στο τέλος της γραμμής (άκρο R) το \dot{U}_r αυξάνεται, το \dot{I}_r είναι μηδέν και το $\cos \varphi_r$ δεν υπάρχει γιατί δεν έχουμε φορτίο.

F Η αύξηση των U_r, I_C μπορεί να γίνει αιτία καταστροφών σε υποσταθμούς.

Όργανα-συσσκευές-υλικά:

1. Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.
2. Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)
3. Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.
4. Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.
5. Βολτόμετρα AC-VA-150.

Πειραματική διαδικασία:



- Συνδέουμε ωμικό φορτίο στο τέλος της γραμμής και το μεταβάλλουμε μειώνοντάς το κατά ένα βήμα κάθε φορά.

- Η γραμμή ρυθμίζεται στα 100 km
- Η U_s ρυθμίζεται στα 380 V

Με τον ίδιο τρόπο συνεχίζουμε και στα 200 km και στα 300 km και καταγράφουμε τις τιμές P_s , Q_s , $U_{s,\pi}$ και P_r , Q_r , $U_{r,\pi}$ στους αντίστοιχους πίνακες.

Γραμμή μεταφοράς 100 km						
Βήμα φορτίου	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
1						
2						
3						
4						
5						

Πίνακας 2.1

Γραμμή μεταφοράς 200 km						
Βήμα φορτίου	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
1						
2						
3						
4						
5						

Πίνακας 2.2

Γραμμή μεταφοράς 300 km						
Βήμα φορτίου	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
1						
2						
3						
4						
5						

Πίνακας 2.3

Άσκηση 3

Ασύμμετρη φόρτιση τριφασικού μετασχηματιστή

Μελέτη συμπεριφοράς τριφασικού μετασχηματιστή όταν αυτός φορτίζεται ασύμμετρα.

Καθαρά οικονομοτεχνικοί λόγοι επιβάλλουν την παραγωγή, τη μεταφορά, και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενης τάσης. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές παίζουν καθοριστικό ρόλο στην όλη διαδικασία, από το στάδιο της παραγωγής μέχρι και το στάδιο της κατανάλωσης.

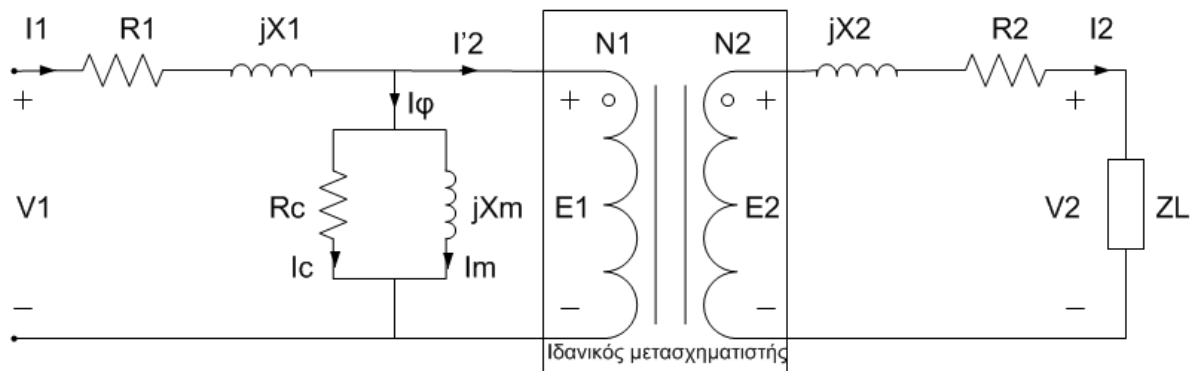
Το μέγεθος της τάσης ποικίλει από στάδιο σε στάδιο. Συνήθως, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στη μέση τάση (6-20 KV), η μεταφορά στην υψηλή τάση (≥ 150 KV) και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είτε στη μέση τάση είτε στη χαμηλή τάση (230/400 V). Καταναλωτές υπάρχουν και στα τρία επίπεδα τάσης. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές αποτελούν ενεργό στοιχείο στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, μετασχηματίζοντας κάθε φορά τις τάσεις στα απαραίτητα επίπεδα τιμών.

Τα τρία τυλίγματα σε κάθε πλευρά ενός τριφασικού μετασχηματιστή, μπορούν να συνδεθούν είτε σε αστέρα (Y) είτε σε τρίγωνο (Δ). Έτσι, ένας τριφασικός μετασχηματιστής έξι τυλιγμάτων, μπορεί να συνδεθεί σε μια από τις παρακάτω τέσσερις συνδεσμολογίες:

- Ø Συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου (D/d)
- Ø Συνδεσμολογία τριγώνου-αστέρα (D/ y)
- Ø Συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα (Y/y)
- Ø Συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου (Y/d)

Τα τριφασικά δίκτυα παρουσιάζουν κατά κανόνα τριφασική συμμετρία στη δομή τους. Αυτή η συμμετρία, μας παρέχει τη δυνατότητα της παράστασης και της ανάλυσης του τριφασικού δικτύου, μέσα από το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα της μιας φάσης. Ωστόσο, πολλές φορές

παρουσιάζονται ασύμμετρες καταστάσεις στα δίκτυα, με αποτέλεσμα η συμμετρία αυτή παύει να υφίσταται και το γεγονός αυτό δυσχεραίνει κατά πολύ την ανάλυση του συστήματος. Περιπτώσεις ασυμμετρίας εμφανίζονται από πολλούς παράγοντες, όπως βραχυκύκλωμα μιας φάσης με τη γη ή μεταξύ δύο φάσεων, ακόμα, λόγω έντονων καιρικών συνθηκών (κεραυνοί, χιονοπτώσεις). Επίσης, όταν κόβεται η μία ή και οι δύο από τις τρεις φάσεις και εξαιτίας ασύμμετρων φορτίων. Προκαλούν κατά τη διάρκεια της εκδήλωσής τους βύθιση τάσης και επιπλέον ένας μετασχηματιστής ο οποίος φορτίζεται ασύμμετρα υπόκειται σε έντονες θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις (τόσο στα τυλίγματα του όσο και στη μόνωση του), οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν καταστρεπτικά αποτελέσματα, στην περίπτωση της μη έγκαιρης εξουδετέρωσής τους. Η μη έγκαιρη απομόνωση του σφάλματος, μπορεί να δημιουργήσει και προβλήματα αστάθειας στο σύστημα.



Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή

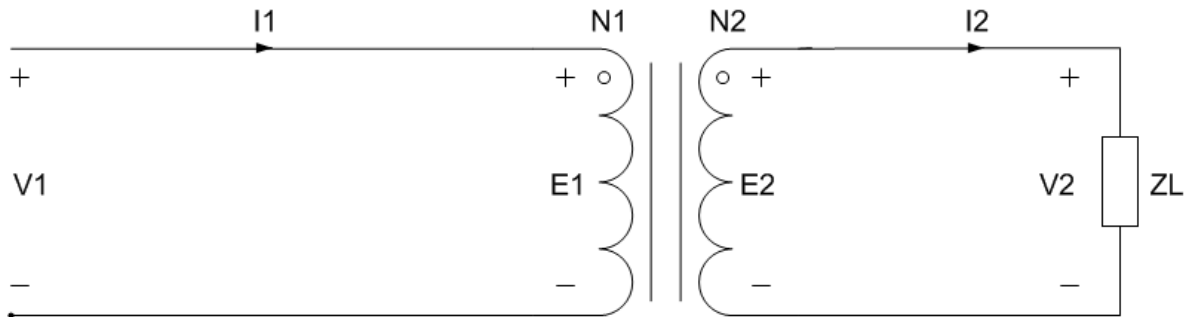
Σχήμα 3.1

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν και οι τέσσερις συνδεσμολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, με σκοπό να βγουν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά τη λειτουργία των μετασχηματιστών και πώς επηρεάζεται η λειτουργία τους ανάλογα με την εκάστοτε συνδεσμολογία και φόρτισή τους. Πιο συγκεκριμένα, μελετάμε το πώς θα πρέπει να είναι οι συνδεσμολογίες ενός τριφασικού μετασχηματιστή (Μ/Σ) ούτως ώστε να είναι δυνατή η τροφοδότηση ενός μονοφασικού φορτίου. Γιατί όπως παρατηρήθηκε στο εργαστήριο, κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, φάνηκε ότι τελικά δεν είναι δυνατόν να τροφοδοτήσουμε ένα μονοφασικό φορτίο με οποιαδήποτε συνδεσμολογία ενός τριφασικού μετασχηματιστή.

Για να μπορέσει ένας Μ/Σ να λειτουργήσει και να τροφοδοτήσει ένα μονοφασικό φορτίο θα πρέπει να καταλάβει κανείς την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή όπως επίσης και από το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ του σχήματος 3.1. Συγκεκριμένα, για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία ενός Μ/Σ, θα πραγματοποιηθεί μια ανάλυση στον ιδανικό Μ/Σ. Η ανάλυση αυτή, θα είναι απλουστευμένη και θα βασιστεί σε συγκεκριμένες απλοποιητικές παραδοχές, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια σημαντική απόκλιση από την πραγματική λειτουργία του Μ/Σ. Οι απλοποιητικές παραδοχές είναι οι εξής:

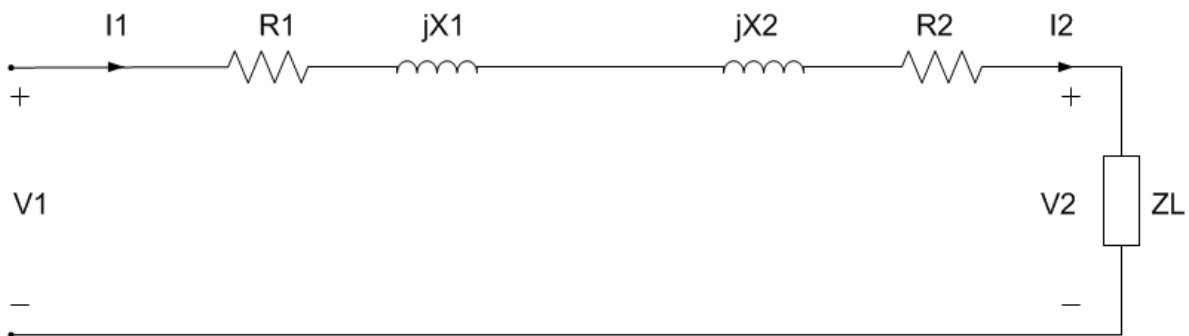
- Οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) αμελούνται.
- Οι μαγνητικές ροές από σκέδαση, τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα αμελούνται.

- Η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος θεωρείται άπειρη, με αποτέλεσμα το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εγκατάσταση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα να είναι μηδενικό.
- Οι απώλειες του πυρήνα (μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων) θεωρούνται αμελητέες.



Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μετασχηματιστή

Σχήμα 3.2



Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Σχήμα 3.3

Με αυτές τις απλοποιητικές παραδοχές καταλήγουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού μετασχηματιστή σχήμα 3.2. Επίσης, από το κύκλωμα του σχήματος 3.3 μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε πώς λειτουργεί ένας μετασχηματιστής. **Δηλαδή, αυτό που βλέπουμε ξεκάθαρα πλέον, είναι ότι δεν μπορούμε να έχουμε ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα ενός Μ/Σ εάν το πρωτεύον τύλιγμα δεν διαρρέεται από ρεύμα.**

Κατά την συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 υπάρχει η δυνατότητα να τροφοδοτηθεί ένα μονοφασικό φορτίο, καθώς το ρεύμα μπορεί να περάσει από τις φάσεις R-S έστω μέσω του ενός τυλίγματος. Αντίστοιχα τώρα και από το δευτερεύον τύλιγμα μεταξύ των φάσεων r-s μπορεί να περάσει το ρεύμα. **Οπότε με την συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου μπορεί να τροφοδοτηθεί ένα μονοφασικό φορτίο.** Μόνο που σε αυτή την περίπτωση δεν θα έχουμε πολική τάση 400 V στη μεριά της χαμηλής τάσης. Επιπλέον, ένα πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι, στην περίπτωση ασυμμετρίας φορτίου οι τάσεις στα άκρα του φορτίου δεν επηρεάζονται. Η συνδεσμολογία τριγώνου-

τριγώνου, χρησιμοποιείτε κυρίως σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης και χαμηλής τάσης.

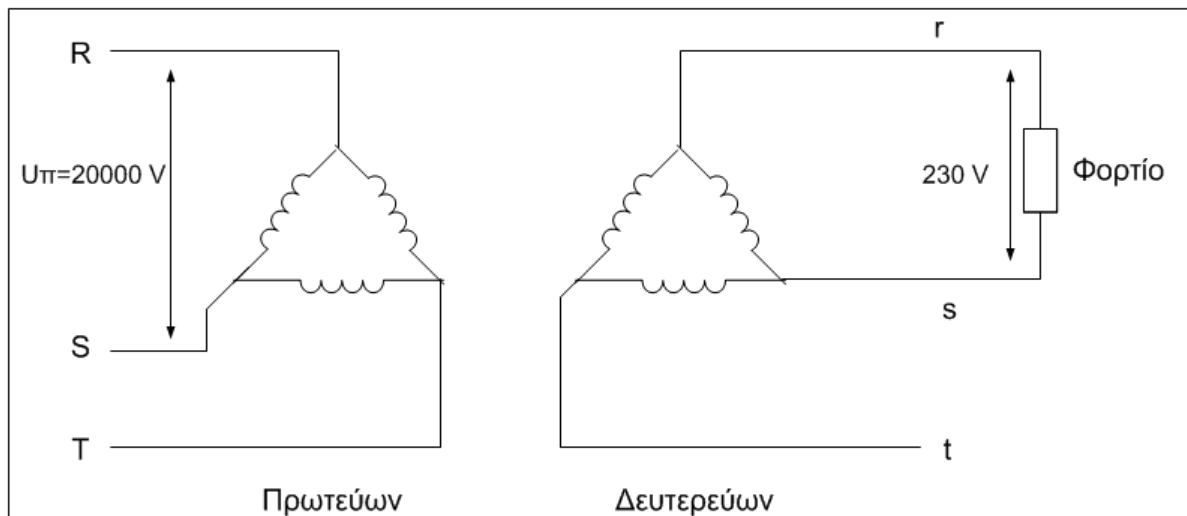
Ο λόγος των σπειρών είναι:

$$\alpha = \frac{U_1}{U_2} = \frac{20000}{230} = 87$$

Ο λόγος των τάσεων είναι:

$$\alpha' = \frac{U_{1\pi}}{U_{2\pi}} = \frac{20000}{230} = 87$$

3Φ Μετασχηματιστής



Σχήμα 3.4: Συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου

Με την **συνδεσμολογία τριγώνου-αστέρα** σχήμα 3.5, πάλι βλέπουμε ότι και με αυτή τη συνδεσμολογία **μπορεί να τροφοδοτηθεί ένα μονοφασικό φορτίο**. Γιατί, τόσο στη μεριά του πρωτεύοντος όσο και στη μεριά του δευτερεύοντος, ένα είναι το τύλιγμα το οποίο διαρρέεται από ρεύμα.

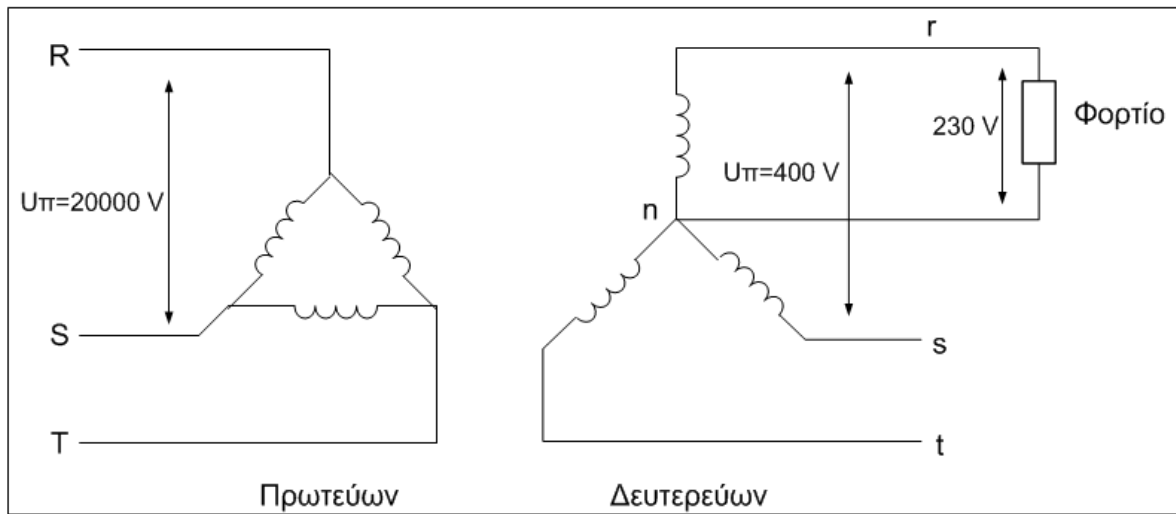
Ο λόγος των σπειρών είναι:

$$\alpha = \frac{U_1}{U_2} = \frac{20000}{230} = 87$$

Ο λόγος των τάσεων είναι:

$$\alpha' = \frac{U_{1\pi}}{U_{2\pi}} = \frac{20000}{400} = 87$$

3Φ Μετασχηματιστής



Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία τριγώνου-αστέρα

Με την **συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα** σχήμα 3.6, σε αντίθετη περίπτωση με τις δύο προηγούμενες συνδεσμολογίες, **εδώ δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί ένα μονοφασικό φορτίο**, καθώς το ρεύμα στο πρωτεύων περνάει από δύο τυλίγματα, ενώ στο δευτερεύων το φορτίο είναι συνδεδεμένο μόνο σε ένα τύλιγμα. Θα μπορούσε να τροφοδοτηθεί το φορτίο, εάν ήταν συνδεδεμένο μεταξύ των δύο φάσεων ή εάν γινόταν η χρήση του ουδέτερου αγωγού στον κοινό κόμβο των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος ή η τροφοδότηση από την μεριά της υψηλής τάσης να γινόταν μονοφασική, δηλαδή μεταξύ κάποιας φάσης και του ουδέτερου κόμβου.

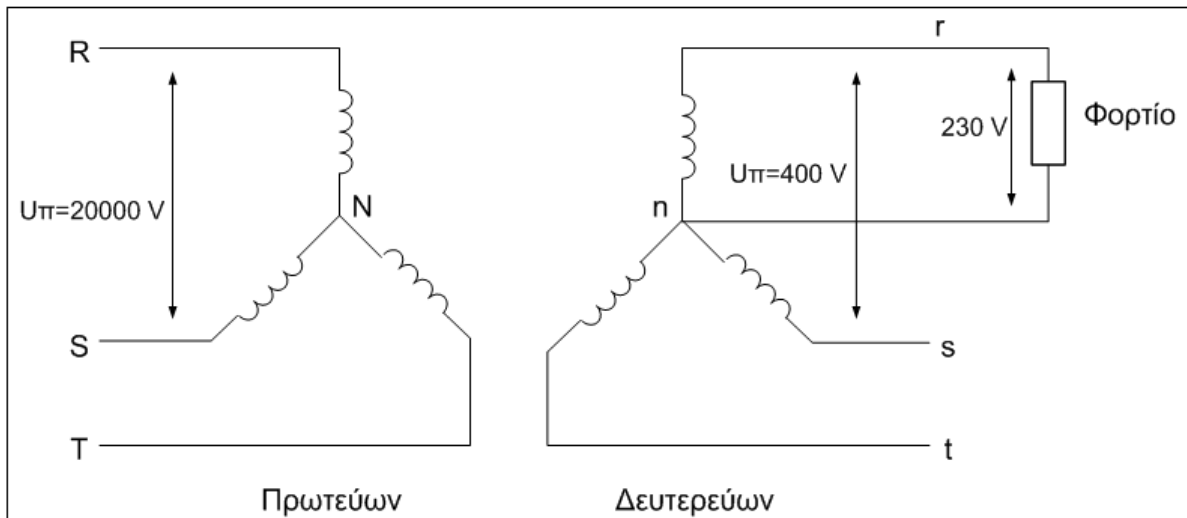
Ο λόγος των σπειρών είναι:

$$\alpha = \frac{U_1}{U_2} = \frac{20000/\sqrt{3}}{230} = \frac{20000}{230\sqrt{3}} = \frac{20000}{400} = 50$$

Ο λόγος των τάσεων είναι:

$$\alpha' = \frac{U_{1\pi}}{U_{2\pi}} = \frac{20000}{400} = 50$$

3Φ Μετασχηματιστής



Σχήμα 3.6: Συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα

Με την συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο πάλι θα είχαμε το ίδιο πρόβλημα όπως με την συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα. Τώρα όμως με την **συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο με ουδέτερο στη μεριά της υψηλής τάσης** σχήμα 3.7, **μπορεί να τροφοδοτηθεί ένα μονοφασικό φορτίο**, καθώς τώρα το ρεύμα από την μεριά της υψηλής τάσης μπορεί να περάσει από ένα μόνο τύλιγμα μέσω του ουδέτερου αγωγού και αντίστοιχα να περάσει το ρεύμα από την μεριά της χαμηλής τάσης από ένα τύλιγμα, όπου και βρίσκεται το φορτίο που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε. Τώρα όμως δεν θα έχουμε πολική τάση 400V στη χαμηλή τάση.

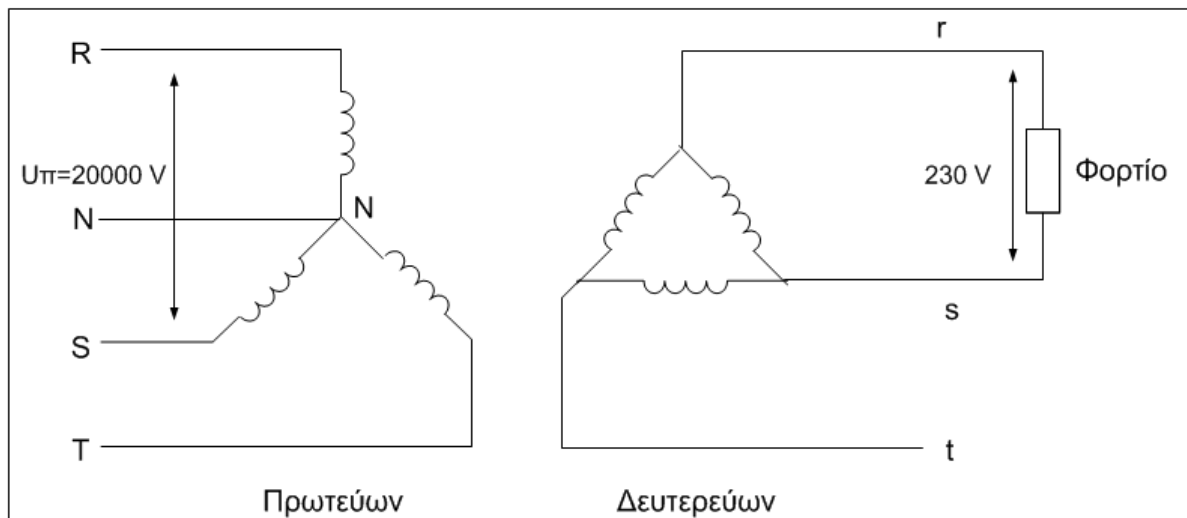
Ο λόγος των σπειρών είναι:

$$\alpha = \frac{U_1}{U_2} = \frac{20000/\sqrt{3}}{230} = \frac{20000}{230\sqrt{3}} = \frac{20000}{400} = 50$$

Ο λόγος των τάσεων είναι:

$$\alpha' = \frac{U_{1\pi}}{U_{2\pi}} = \frac{20000}{230} = 87$$

3Φ Μετασχηματιστής



Σχήμα 3.7: Συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο με ουδέτερο στη μεριά της υψηλής τάσης

Όργανα-συσσκευές-υλικά:

Τριφασικός μετασχηματιστής 1.5 KVA 400 V Δ / 400 V Υ

Τριφασικά ωμικά φορτία RL-100-3

Βολτόμετρο GW Digital Multimeter GDM-8145

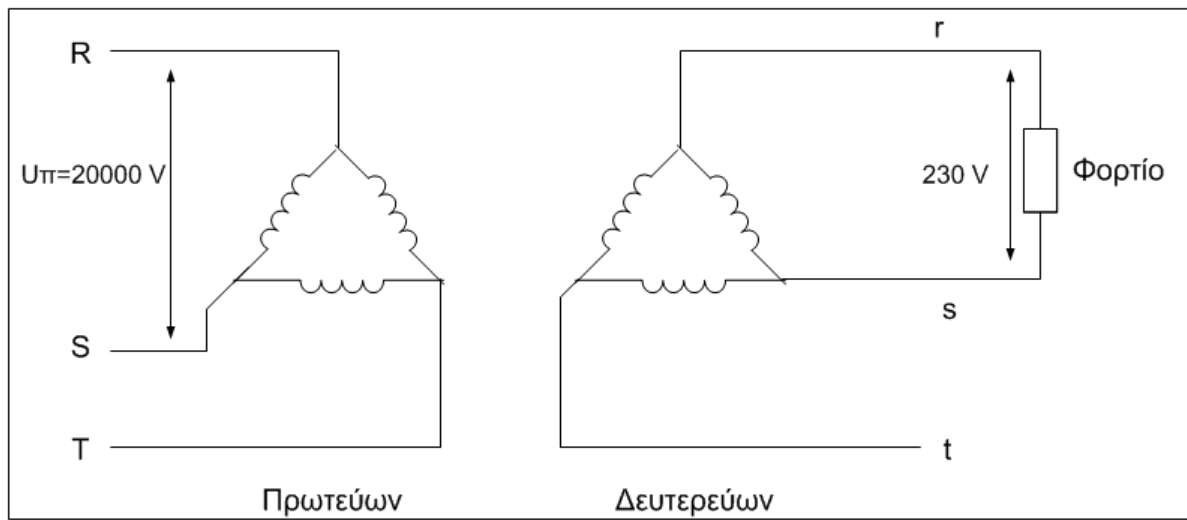
Αμπερόμετρα GW instek GDM-8245

Πειραματική διαδικασία:

Στο εργαστήριο βέβαια, δεν έχουμε πολική τάση 20000V αλλά τα 400 V. Επίσης, ο Μ/Σ που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις δεχόταν στο πρωτεύων τύλιγμα 400 V και στο δευτερεύων 230 V. Που σημαίνει ότι σε κάθε δευτερεύων τύλιγμα επάγεται τάση ίση με την τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύων τύλιγμα, δια ρίζα τρία. Δηλαδή, $U_2/\text{τύλιγμα} = (U_1/\text{τύλιγμα}) / \sqrt{3}$ V.

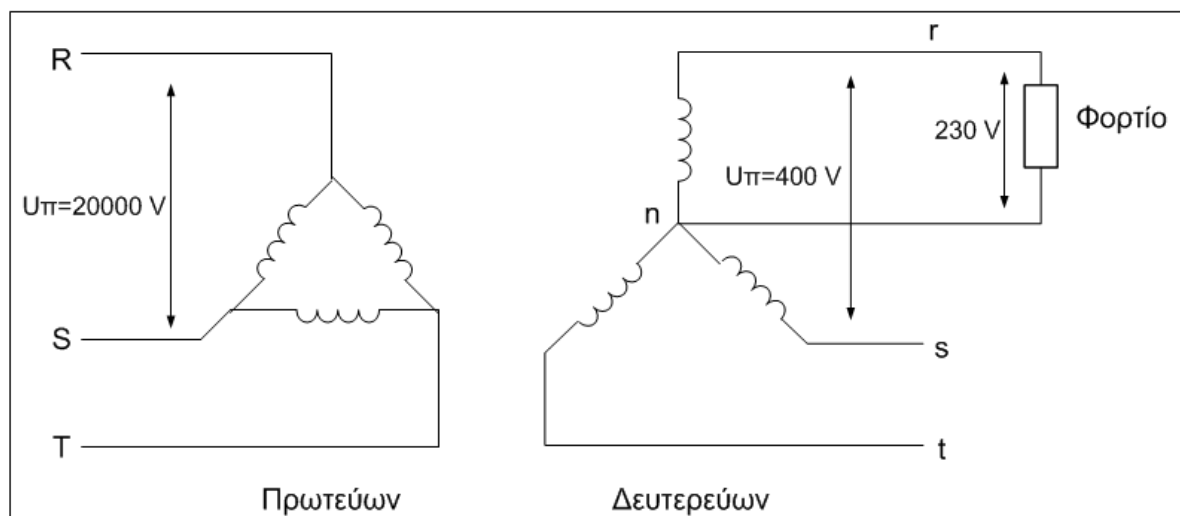
- Να γίνουν όλες οι παραπάνω συνδεσμολογίες και να συμπληρωθούν οι παρακάτω πίνακες.
- Να βρεθεί σε κάθε περίπτωση εάν θα λειτουργήσει ο μετασχηματιστής και γιατί.
- Να υπολογίσετε σε κάθε περίπτωση τον λόγο σπειρών a και τον λόγο τάσεων a' .

3Φ Μετασχηματιστής



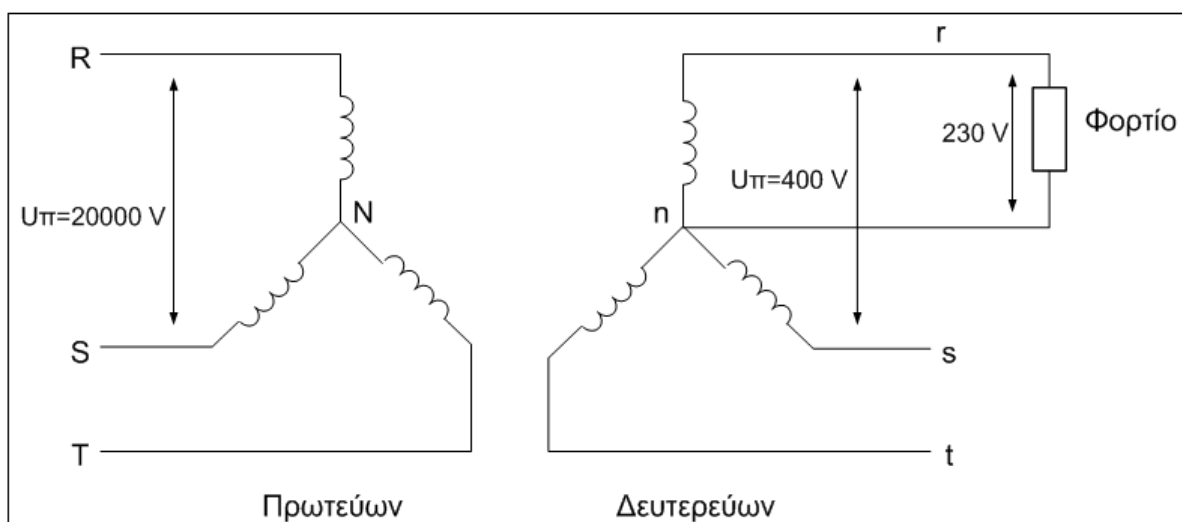
Συνδεσμολογία ΔΔ							
Συνδεσμολογία	R (Ω)	$U_{1,\pi}$ (V)	$U_{2,\pi}$ (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)
1Φ							
2Φ							
3Φ/Αστέρα							

3Φ Μετασχηματιστής



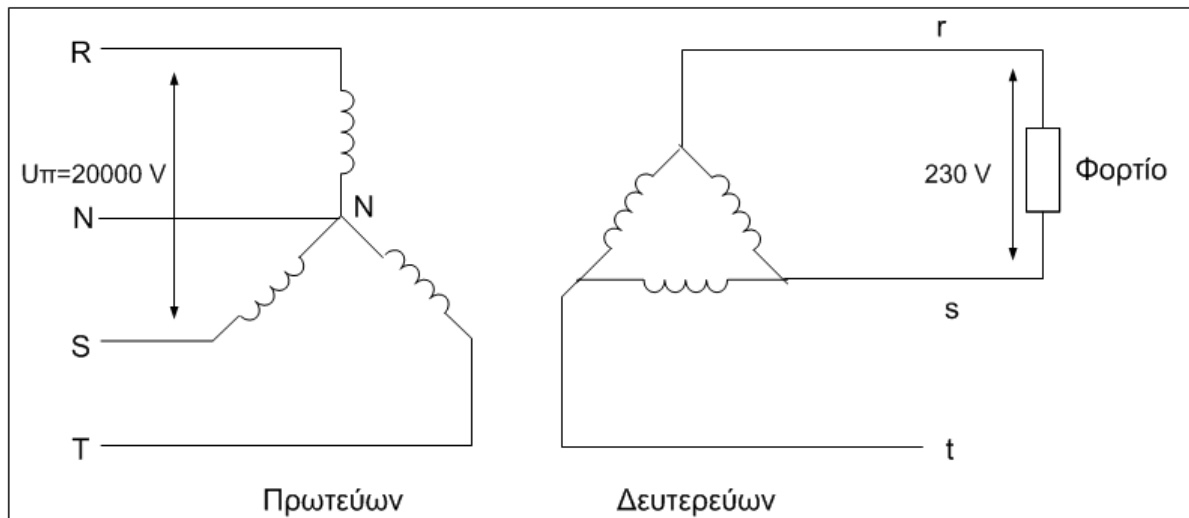
Συνδεσμολογία ΔΥ							
Συνδεσμολογία	R (Ω)	U _{1,π} (V)	U _{2,π} (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)
1Φ							
2Φ							
3Φ/Αστέρα							

3Φ Μετασχηματιστής



Συνδεσμολογία ΥΥ							
Συνδεσμολογία	R (Ω)	U _{1,π} (V)	U _{2,π} (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)
1Φ							
2Φ							
3Φ/Αστέρα							

3Φ Μετασχηματιστής



Συνδεσμολογία ΥΔ με ουδέτερο στη μεριά της υψηλής τάσης							
Συνδεσμολογία	R (Ω)	$U_{1,\pi}$ (V)	$U_{2,\pi}$ (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	P_1 (W)	P_2 (W)
1Φ							
2Φ							
3Φ/Αστέρα							

Άσκηση 4

Ρύθμιση τάσης στο τέλος της γραμμής με σύγχρονη μηχανή

Αντικείμενο της άσκησης:

α) Παρουσίαση της δυνατότητας του σύγχρονου πυκνωτή για ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους ανάλογα με τη φόρτιση της γραμμής.

β) Παραλληλισμός σύγχρονης μηχανής με το δίκτυο.

γ) Ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης (I_f) της μηχανής και αντιστάθμιση του φορτίου.

α) Παρουσίαση της δυνατότητας του σύγχρονου πυκνωτή για ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους ανάλογα με τη φόρτιση της γραμμής.

Στην άσκηση 1 για ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς παρουσιάστηκε η **συστοιχία στατών πυκνωτών**. Στην παρούσα άσκηση θα χρησιμοποιηθεί **σύγχρονος πυκνωτής** με τον οποίο επιτυγχάνεται πιο ομαλή ρύθμιση. Ο σύγχρονος πυκνωτής είναι ουσιαστικά μια σύγχρονη μηχανή και συγκεκριμένα ένας τριφασικός σύγχρονος κινητήρας, ο οποίος όταν συνδέεται στο δίκτυο λειτουργεί μόνο εν κενώ, δηλαδή στον άξονά του δεν έχει συνδεδεμένο κάποιο μηχανικό φορτίο. Ωστόσο, όταν κάποιος σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται για να κινεί ένα φορτίο, είναι δυνατό να λειτουργεί με υπερδιέγερση και να βελτιώνει ταυτόχρονα το συντελεστή ισχύος του συστήματος.

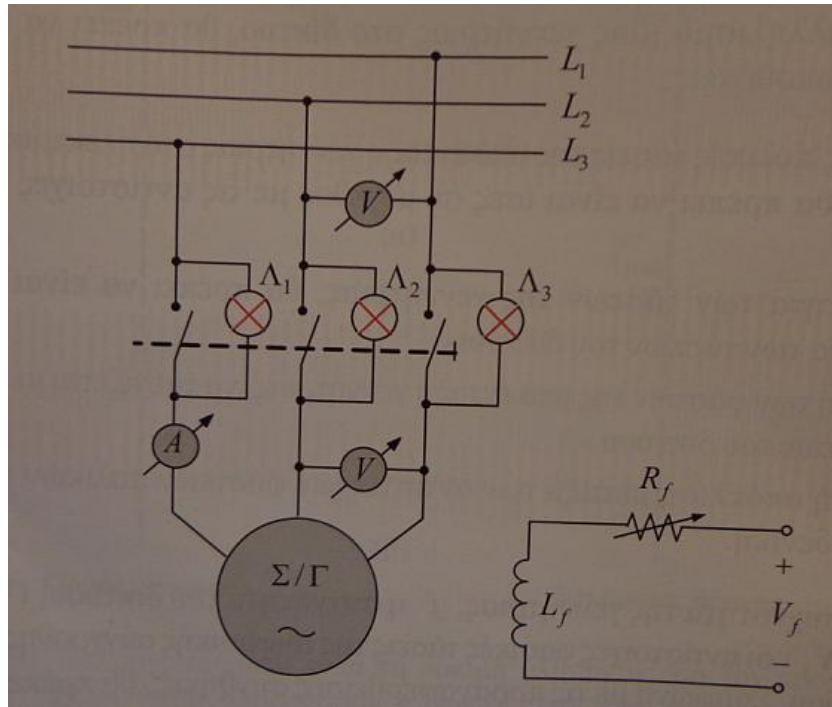
Σε μια σύγχρονη μηχανή, η ανταλλαγή πραγματικής ισχύς με το ηλεκτρικό δίκτυο, ελέγχεται μέσω της μηχανικής ισχύος στον άξονα, ενώ η άεργη ισχύς ελέγχεται μέσω του ρεύματος διέγερσης. Ο συντελεστής ισχύος του εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα διέγερσης.

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι ακριβοί κινητήρες συγκρινόμενοι με του ασύγχρονους. Έχουν ορισμένες ιδιότητες χάρη στις οποίες προτιμούνται σε ειδικές περιπτώσεις. Συνήθως οι χρησιμοποιούμενοι στη βιομηχανία σύγχρονοι κινητήρες είναι πάνω από 100 KW. Οι κινητήρες αυτοί προτιμούνται όταν απαιτείτε απολύτως σταθερή ταχύτητα περιστροφής και μεγάλος βαθμός απόδοσης. Σαν παράδειγμα εφαρμογών αναφέρουμε την κίνηση εναλλακτών που παράγουν ρεύμα διαφορετικής συχνότητας από αυτή του δικτύου, την κίνηση ελάστρων, την κίνηση μεγάλων φυγοκεντρικών αντλιών, συμπιεστών κ.λπ. Άλλο πεδίο εφαρμογής των σύγχρονων κινητήρων είναι η βελτίωση του συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης ή γενικότερα ενός δικτύου. Επίσης, μια άλλη σπουδαία εφαρμογή του σύγχρονου κινητήρα είναι η ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους.

β) Παραλληλισμός σύγχρονης μηχανής με το δίκτυο.

Για τον παραλληλισμό μιας γεννήτριας στο δίκτυο, θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Οι φασικές/πολικές τάσεις της υπό ένταξης γεννήτριας στο ηλεκτρικό σύστημα (δίκτυο), θα πρέπει να είναι ίσες σε μέγεθος με τις αντίστοιχες τάσεις του δικτύου.
2. Η συχνότητα των τάσεων της γεννήτριας, θα πρέπει να είναι ελαφρά μεγαλύτερη από την συχνότητα των τάσεων του δικτύου.
3. Η διαδοχή των φάσεων της υπό ένταξης γεννήτριας, να ταυτίζεται με τη διαδοχή των φάσεων του δικτύου.
4. Η φασική απόκλιση μεταξύ των αντίστοιχων φασικών/πολικών τάσεων, να είναι μηδενική.

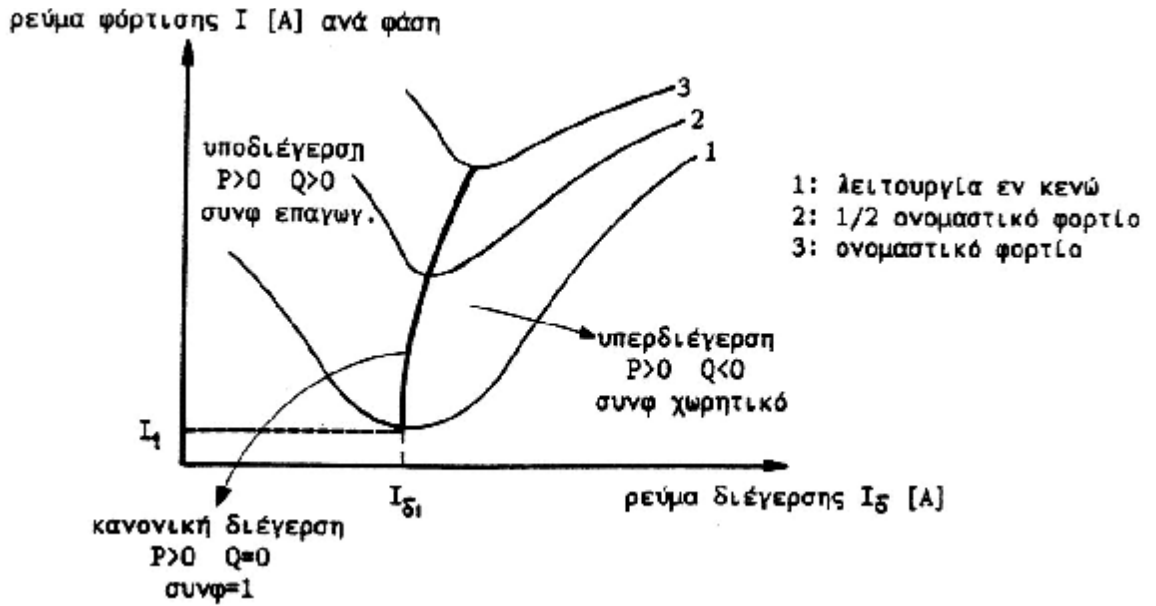


Σχήμα 4.1

Η πρώτη συνθήκη, ελέγχεται μέσω βολτομέτρου συνδεδεμένο στους ακροδέκτες της γεννήτριας και του δικτύου. Οι υπόλοιπες τρεις συνθήκες, ελέγχονται συγχρόνως με τη βοήθεια των λεγόμενων πλοηγών λυχνιών (driving lamps), οι οποίες συνδέονται στους ακροδέκτες του διακόπτη και σε κάθε φάση. Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιεί τη λεγόμενη συνδεσμολογία σβέσης. Έτσι για την ικανοποίηση της τρίτης συνθήκης, η προς παραλληλισμό γεννήτρια έχει την ορθή διαδοχή φάσης με το δίκτυο, όταν και οι τρεις λυχνίες ανάβουν ή σβήνουν συγχρόνως. Κλείνουμε το διακόπτη παραλληλισμού, κατά την περίοδο σβέσης των λυχνιών.

γ) Ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης (I_f) της μηχανής και αντιστάθμιση του φορτίου.

Όταν ένας σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί εν κενώ, το ρεύμα I που απορροφάει από το δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος, εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης I_δ με το οποίο τροφοδοτείτε το τύλιγμα των πόλων του δρομέα .



Σχήμα 4.2

Στο σχήμα 4.2, φαίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος οπλισμού I (το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο) του κινητήρα συναρτήσει του ρεύματος διέγερσής του I_{δ} . Αυτή η καμπύλη ονομάζεται *V χαρακτηριστική του σύγχρονου κινητήρα*, επειδή ακριβώς έχει σχήμα V. Στο χαμηλότερο σημείο μιας τέτοιας καμπύλης (ελάχιστο ρεύμα οπλισμού) αντιστοιχίζεται η περίπτωση που ο κινητήρας καταναλώνει αποκλειστικά ενεργό ισχύ. Οι V χαρακτηριστικές ενός κινητήρα είναι άπειρες και η καθεμιά τους αντιστοιχεί σε διαφορετικό ποσοστό κατανάλωσης ενεργού ισχύος.

Για μια ορισμένη τιμή του ρεύματος διέγερσης ($I_{\delta 1}$) το ρεύμα φόρτισης (I_1) γίνεται ελάχιστο. Σε αυτή την περίπτωση (κανονική διέγερση) ο κινητήρας φορτίζει το ηλεκτρικό δίκτυο ωμικά, δηλαδή η τάση του δικτύου και το ρεύμα του κινητήρα είναι σε φάση και ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα είναι ίσος με την μονάδα ($\cos \varphi = 1$). Για τιμή του ρεύματος διέγερσης μικρότερη ή μεγαλύτερη του $I_{\delta 1}$ το ρεύμα φόρτισης του κινητήρα μεγαλώνει.

Η μείωση του ρεύματος διέγερσης (κάτω από το $I_{\delta 1}$) για σταθερή τάση στο τύλιγμα του τυμπάνου, προκαλεί την αύξηση του μεγέθους του ρεύματος τυμπάνου και την αύξηση της φασικής του απόκλισης με την τάση του τυμπάνου, με το ρεύμα τυμπάνου να έπαιτε της τάσης τυμπάνου. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητήρας λειτουργεί σε υποδιέγερση και εμφανίζει επαγωγική συμπεριφορά, δηλαδή καταναλώνει άεργο ισχύ από το δίκτυο και ο συντελεστής ισχύος του είναι επαγωγικός ($\cos \varphi = \text{επαγωγικό}$).

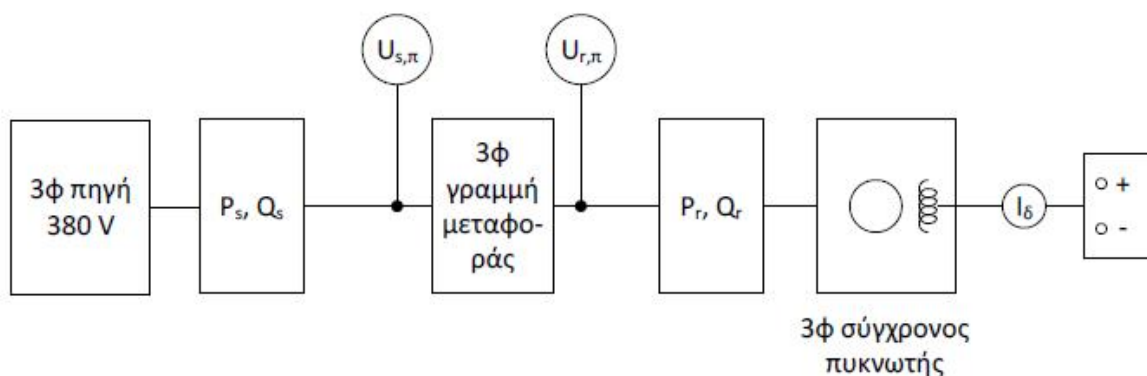
Αντίστοιχα τώρα, η αύξηση του ρεύματος διέγερσης (πάνω από το $I_{\delta 1}$) για σταθερή τάση τυμπάνου, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του ρεύματος τυμπάνου και τη μεταβολή της φασικής του απόκλισης με την τάση τυμπάνου, με το ρεύμα τυμπάνου να προηγείται της τάσης τυμπάνου. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητήρας λειτουργεί σε υπερδιέγερση και εμφανίζει χωρητική συμπεριφορά, δηλαδή προσφέρει άεργο ισχύ στο δίκτυο και ο συντελεστής ισχύος του είναι χωρητικός ($\cos \varphi = \text{χωρητικό}$).

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η άεργος ισχύς που καταναλώνει ή που προσφέρει στο δίκτυο ένας σύγχρονος κινητήρας είναι δυνατόν να ρυθμιστεί μέσω του ρεύματος διέγερσής του. Επίσης, οι σύγχρονοι κινητήρες, έχουν την μοναδική ικανότητα να λειτουργούν με διαφορετικούς συντελεστές ισχύος.

Όργανα-συσκευές-υλικά:

1. Τριφασική πηγή HMD-150-PPC-AC.
2. Τριφασικός μετρητής Watt-Var H-W/V-150. (2)
3. Μοντέλο τριφασικής γραμμής μεταφοράς H-TLS-150.
4. Τριφασική σύγχρονη μηχανή SM-150.
5. Πηγή συνεχούς ρεύματος HMD-150-PPC-DC.
6. Τριφασικό μεταβλητό ωμικό-άεργο φορτίο RLC-150.
7. Αμπερόμετρα-βολτόμετρα AC-VA-150 και DC-VA-150.

Πειραματική διαδικασία:



- Συνδέστε τη σύγχρονη τριφασική μηχανή στο τέλος του μοντέλου της τριφασικής γραμμής μεταφοράς, χωρίς διέγερση D.C. στη μηχανή.
- Η γραμμή ρυθμίζεται στα 100 km
- Η U_s ρυθμίζεται στα 380 V
- Όταν η μηχανή (σύγχρονος κινητήρας-σύγχρονος πυκνωτής) επιταχυνθεί, συνδέστε τη διέγερση D.C..
- Μεταβάλλεται τη διέγερση D.C. και παρατηρήστε το αποτέλεσμα στην τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς.
- Καταγράψτε τις ενδείξεις $P_s, Q_s, U_{s,\pi}$ και $P_r, Q_r, U_{r,\pi}$, καθώς το ρεύμα διέγερσης I_d μεταβάλλεται από 0,0 A έως 1 A σε πέντε βήματα των 0,2 A, στον πίνακα 4.1.

Με τον ίδιο τρόπο επαναλάβετε και για τα 200 km και για τα 300 km και καταγράψτε τις τιμές $P_s, Q_s, U_{s,\pi}$ και $P_r, Q_r, U_{r,\pi}$ στους αντίστοιχους πίνακες.

- Να σχεδιαστούν τα διαγράμματα $U_{r,\pi} = f(Q_r)$, από $-Q_r$ έως $+Q_r$, και για τις τρεις γραμμές μαζί.

Γραμμή μεταφοράς 100 km						
I_{δ} [A]	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
0,0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

Πίνακας 4.1

Γραμμή μεταφοράς 200 km						
I_{δ} [A]	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
0,0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

Πίνακας 4.2

Γραμμή μεταφοράς 300 km						
I_δ [A]	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
0,0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

Πίνακας 4.3

- Συνδέστε το τριφασικό μεταβλητό ωμικό φορτίο στο τέλος της γραμμής μεταφοράς παράλληλα στον κινητήρα. Ξεκινήστε και συγχρονίστε τον κινητήρα και τροφοδοτήστε τον με ρεύμα διέγερσης τέτοιο, ώστε η τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς να είναι 380 V. Μεταβάλλεται το ωμικό φορτίο κατά ένα βήμα κάθε φορά και ξαναρυθμίστε, αν χρειάζεται, το ρεύμα διέγερσης έτσι ώστε η τάση στο τέλος της γραμμής μεταφοράς να παραμένει σταθερή στα 380 V.

Καταγράψτε τις ενδείξεις P_s , Q_s , $U_{s,\pi}$ και P_r , Q_r , $U_{r,\pi}$ στον πίνακα 4.4.

- Να σχεδιαστεί το διάγραμμα $P_r = f(Q_r)$.

Γραμμή μεταφοράς 100 km						
Βήμα φορτίου	P_s [W]	Q_s [Var]	$U_{s,\pi}$ [V]	P_r [W]	Q_r [Var]	$U_{r,\pi}$ [V]
1						
2						
3						
4						
5						

Πίνακας 4.4

Άσκηση 5

Εναέρια τριφασική γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης 220 KV

Γραμμή μεταφοράς 200 km με μικρό και μεγάλο φορτίο RL με ρύθμιση τάσης και παρατήρηση φαινόμενου Ferranti.

Στην άσκηση αυτή, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά μιας γραμμής μεταφοράς 200 km υψηλής τάσης 220 KV. Πιο συγκεκριμένα, θα παρατηρήσουμε τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη τάση (U) και ρεύμα (I) καθώς και τις γωνίες μεταξύ αυτών ($\cos \varphi$) τόσο στην αναχώρηση όσο και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς.

Υπάρχει ένα μέγιστο όριο ως προς τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να διακινηθεί μέσα από μια γραμμή μεταφοράς, τόσο σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης όσο και σε συνθήκες μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας. Η στατική κατάσταση λειτουργίας, περιλαμβάνει και την περίπτωση των χρονικά αργά μεταβαλλόμενων φορτίων. Καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των ορίων φόρτισης (ως προς τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ) μιας γραμμής μεταφοράς, παίζουν οι παράμετροι σειράς της γραμμής, δηλαδή η ωμική της αντίσταση και η επαγωγική της αντίδραση. Η ωμική αντίσταση της γραμμής, καθορίζει το λεγόμενο θερμικό όριο φόρτισης (thermal transmission limit) της γραμμής. Πράγματι, η αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του διερχόμενου ρεύματος και κατ' επέκταση την αύξηση των ωμικών απωλειών της γραμμής, οι οποίες είναι ανάλογες της τιμής του τετραγώνου του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού. Η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, μπορεί να προκαλέσει μόνιμες βλάβες στους αγωγούς της γραμμής.

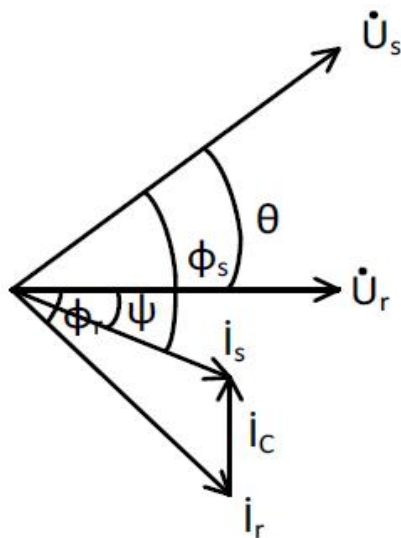
Όρια ηλεκτρικών στοιχείων εναέριων γραμμών μεταφοράς.

R_0 (Ω / km) και φάση	0.01 \rightarrow 0.3
L_0 (mH/km) και φάση	0.6 \rightarrow 1.6
C_0 (μ F/km) και φάση	0.006 \rightarrow 0.02

Στο εργαστήριο, τη φασική γωνία θ τη μετράμε με το γωνιόμετρο. **Στη πράξη,** δεν είναι εφικτή η απ' ευθείας μέτρηση της γωνίας θ όπως στο εργαστήριο. Η επιχείρηση ηλεκτρισμού υπολογίζει τη φασική γωνία θ μέσω άλλων μετρήσιμων γωνιών.

Ορισμοί γωνιών:

- Όταν ο συντελεστής ισχύος στο τέλος της γραμμής είναι **επαγωγικός**, το διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων έχει την παρακάτω μορφή:



φ_s : γωνία μεταξύ \dot{U}_s, \dot{I}_s
 φ_r : γωνία μεταξύ \dot{U}_r, \dot{I}_r
 θ : γωνία μεταξύ \dot{U}_s, \dot{U}_r
 ψ : γωνία μεταξύ \dot{U}_r, \dot{I}_s

Σχήμα 5.1

Τότε το $|\dot{I}_s|$ είναι μικρότερο από το $|\dot{I}_r|$ λόγω του \dot{I}_c .

- Όταν ο συντελεστής ισχύος στο τέλος της γραμμής είναι **χωρητικός**, τότε τα ρεύματα προκύπτουν πάνω από τον οριζόντιο άξονα (\dot{U}_r) και το $|\dot{I}_s|$ είναι μεγαλύτερο από το $|\dot{I}_r|$.

Υπολογισμός φασικής γωνίας:

Γ.Μ. μικρού μήκους:

$$R \neq 0, X_L \neq 0, C = 0$$

$$\dot{Z}_Y = R + jX_L \neq 0$$

$$\dot{Y}_Y = j\omega C = 0$$

$$\theta = \varphi_s - \varphi_r$$

Γ.Μ. μέσου και μεγάλου μήκους:

$$R \neq 0, X_L \neq 0, C \neq 0$$

$$\dot{Z}_Y = R + jX_L \neq 0,$$

$$\dot{Y}_Y = j\omega C \neq 0$$

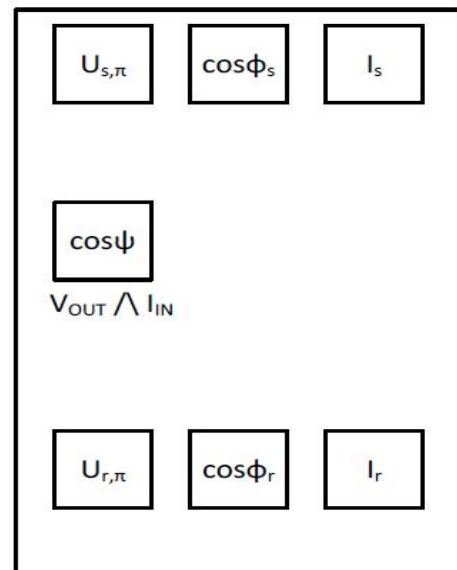
$$\theta = \begin{cases} \varphi_s + \psi, & \text{PF στο τέλος της γραμμής} \\ & \text{χωρητικός} \\ \varphi_s - \psi, & \text{PF στο τέλος της γραμμής} \\ & \text{επαγωγικός} \end{cases}$$

όπου ψ το όρισμα του \dot{I}_s .

Η φασική γωνία θ υπολογίζεται με βάση τους παραπάνω τύπους. Οι επιμέρους γωνίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό προκύπτουν από μετρήσεις των αντίστοιχων συνημιτόνων.

Στοιχεία του εξομοιωτή:

Ο εξομοιωτής που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή της άσκησης περιλαμβάνει μετρητές των μεγεθών που φαίνονται στο διπλανό σχήμα.



Σχήμα 5.2



Εικόνα 5

- Η τάση τροφοδοσίας της γραμμής είναι ρυθμιζόμενη.
- Δίνονται ως ηλεκτρικά στοιχεία της γραμμής τα εξής:

$R_0 = 0.12 \Omega/\text{km}$ και φάση

$L_0 = 1.12 \text{ mH}/\text{km}$ και φάση

$C_0 = 0.01 \text{ mF}/\text{km}$ και φάση

- Το μοντέλο της γραμμής που περιλαμβάνει ο εξομοιωτής αποτελείται από ένα ισοδύναμο 'T' κύκλωμα για κάθε 50 km γραμμής. Με τη βοήθεια περιστροφικού διακόπτη εισάγουμε όσα τέτοια τμήματα απαιτούνται.
- Για γραμμή 200 km υπολογίζονται τα εξής:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_\gamma &= R + jX_L = R_0 l + j\omega L_0 l = 0.12 \cdot 200 + j314 \cdot 1.12 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \\ &= 24 + j 70.33 \Omega \text{ ανά φάση}\end{aligned}$$

$$\dot{Y}_\gamma = j\omega C = j\omega C_0 l = j314 \cdot 0.01 \cdot 10^{-6} \cdot 200 = j6.28 \cdot 10^{-4} S \text{ ανά φάση}$$

- Στο τέλος της γραμμής μπορούν να συνδεθούν φορτία μέσω διακοπών. Τα διαθέσιμα φορτία είναι τα εξής:
 1. Μικρό φορτίο RL με $R_\varphi = 604 \Omega$, $L_\varphi = 2 \text{ H}$ και επομένως:

$$\dot{Z}_\varphi = R_\varphi + jX_\varphi = 604 + j314 \cdot 2 = 604 + j628 \Omega \text{ ανά φάση}$$

2. Μεγάλο φορτίο RL με:

$$\dot{Z}'_\varphi = \frac{\dot{Z}_\varphi}{2} = 302 + j314 \Omega \text{ ανά φάση}$$

- Επίσης στο τέλος της γραμμής μπορούν να συνδεθούν πυκνωτές παράλληλα για ρύθμιση της τάσης. Οι διαθέσιμες τιμές χωρητικότητας είναι από 0.5 έως 7.5 μF με βήμα 0.5 μF .

Όργανα-συσσκευές-υλικά:

Εξομοιωτής τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης 220 KV – 80 MVA, DI-200/KV-SLT.

Πειραματική διαδικασία:

A) Επιλέγουμε τάση τροφοδοσίας 220 KV, μήκος γραμμής 200 km και **μικρό φορτίο RL**.

- Καταγράφουμε τις τιμές $U_{s,\pi}$, I_s , $\cos \varphi_s$, $U_{r,\pi}$, I_r , $\cos \varphi_r$, $\cos \psi$.
- Για την ρύθμιση της τάσης: Μέσω διαδοχικών δοκιμών βρίσκουμε την απαραίτητη χωρητικότητα ώστε το $\cos \varphi_r$ να γίνει τουλάχιστον 0.85.
- Καταγράφουμε τις νέες τιμές των $U_{s,\pi}$, I_s , $\cos \varphi_s$, $U_{r,\pi}$, I_r , $\cos \varphi_r$, $\cos \psi$.

B) Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για τάση τροφοδοσίας 220 KV, μήκος γραμμής 200 km και **μεγάλο φορτίο RL**.

Γ) Παρατήρηση φαινομένου Ferranti για μεγάλο φορτίο χωρίς ρύθμιση τάσης.

- Μηδενίζουμε το φορτίο θέτοντας ταυτόχρονα και τους δύο διακόπτες του φορτίου στο OFF.
- Καταγράφουμε τις τιμές $U_{s,\pi}$, I_s , $\cos \varphi_s$, $U_{r,\pi}$, I_r , $\cos \varphi_r$, $\cos \psi$.

	$U_{s,\pi}$ (KV)	I_s (A)	$\cos \varphi_s$	$U_{r,\pi}$ (KV)	I_r (A)	$\cos \varphi_r$	$\cos \psi$
Μικρό φορτίο							
Μικρό φορτίο με ρύθμιση τάσης							
Μεγάλο φορτίο							
Μεγάλο φορτίο με ρύθμιση τάσης							
Ferranti							

Πίνακας 5

Άσκηση 6

Τριφασική γραμμή διανομής 20 KV

Περιγραφή του πάνελ του εργαστηρίου, η εύρεση του δυσμενέστερου καταναλωτή και η εύρεση της τάσης στα άκρα του.

Η παρούσα άσκηση είναι η μόνη άσκηση του εργαστηρίου που αναφέρεται σε γραμμή διανομής. Τέτοιες γραμμές έχουν πολλά φορτία, η ανάλυσή τους όμως είναι εύκολη. Στο πείραμα η τροφοδότηση θα γίνει από τον υποσταθμό (ΥΣ) Α, από τον ΥΣ Β και τέλος και από τους δυο ΥΣ με την ίδια τάση τροφοδοσίας.

Αν θεωρήσουμε τη γραμμή ως μέσης τάσης, τότε οι σταθμοί Α και Β είναι ΥΣ ΥΤ/ΜΤ και τα φορτία είναι ΥΣ ΜΤ/ΧΤ ή καταναλωτές ΜΤ (με δικό τους ΥΣ).

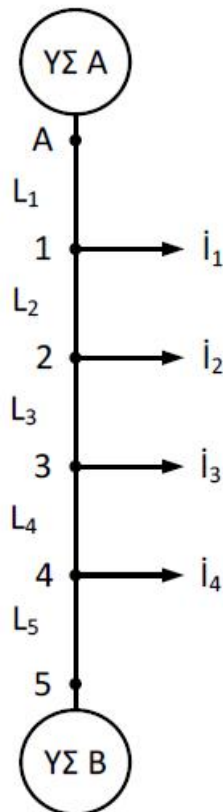
Αν θεωρήσουμε τη γραμμή ως χαμηλής τάσης, τότε οι Α και Β είναι ΥΣ ΜΤ/ΧΤ και τα φορτία είναι οικιακοί καταναλωτές.

Ο δυσμενέστερος καταναλωτής είναι ο καταναλωτής που τροφοδοτείται από τη μικρότερη τάση. Απορροφά ρεύμα από ΥΣ Α και από ΥΣ Β. Παρουσιάζει την ίδια πτώση τάσης και ως προς τον Α και ως προς τον Β. Το ποιος καταναλωτής θα έχει αυτό το χαρακτήρα εξαρτάται από τα φορτία, τα μήκη των γραμμών και τις διατομές τους. Σε ανοικτό δίκτυο δυσμενέστερος καταναλωτής (από πλευράς τάσης) είναι ο τελευταίος. Σε κλειστό δίκτυο βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα. (Στις πόλεις τα δίκτυα είναι κλειστά).

Το είδος των περιοχών κατανάλωσης (αστικές, βιομηχανικές, αγροτικές κ.λ.π.), καθώς επίσης η πυκνότητα των φορτίων και της δόμησης, καθορίζουν τον τύπο των δικτύων μέσης τάσης, δηλαδή εάν είναι υπόγεια ή εναέρια. Στα κέντρα των πόλεων ή σε περιοχές μεγάλης

πυκνότητας φορτίου τα δίκτυα MT είναι υπόγεια, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές τα δίκτυα είναι εναέρια.

Περιγραφή του εξομοιωτή:



Σχήμα 6



Εικόνα 6.1

Ο εξομοιωτής περιλαμβάνει δύο σταθμούς A και B που συνδέονται μέσω γραμμής και μπορεί να τροφοδοτήσει φορτία από τέσσερα διαφορετικά σημεία της γραμμής. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα εξομοίωσης συστημάτων διαφορετικών χαρακτηριστικών:

- ∅ Τα φορτία και οι σταθμοί είναι δυνατό να συνδέονται και να αποσυνδέονται μέσω διακοπών ON/OFF.
- ∅ Οι τάσεις των σταθμών και τα φορτία είναι ρυθμιζόμενα.
- ∅ Μπορούν να επιλεγούν διάφορα μήκη και διατομές για τα 5 τμήματα της γραμμής.

Η τάση κάθε ΥΣ ρυθμίζεται μέσω περιστροφικού διακόπτη και βολτομέτρου και μέσω αμπερομέτρου μετράται το ρεύμα του. Το κάθε (ωμικό) φορτίο ρυθμίζεται μέσω περιστροφικού διακόπτη. Επίσης, υπάρχει αμπερόμετρο για μέτρηση του ρεύματος. Τα μήκη L_1, \dots, L_5 των τμημάτων 1, ..., 5 της γραμμής επιλέγονται μέσω διακοπών. Οι δυνατές επιλογές A, B, ..., F εξηγούνται στο παρακάτω πίνακα (εικόνα 6.2).

	A	B	C	D	E	F	SECTION	
							mm ²	comm.
Km 0		0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	10	10,18
Km 0		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	12,5	12,57
Km 0		0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	15	15,90
Km 0		0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	17,5	—
Km 0		0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	20	19,63
Km 0		0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	22,5	—
Km 0		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	25	25,18
Km 0		1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	30	31,17
Km 0		1,6	3,2	4,8	6,4	8,0	40	40,08
Km 0		2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	50	49,48

Εικόνα 6.2

Στον πίνακα αυτό φαίνεται ότι:

Η κάθε μία από τις επιλογές A έως F (στήλες 1 έως 6) αντιστοιχεί σε πολλές δυνατές τιμές μήκους σε km. Κάθε τέτοια τιμή μήκους αντιστοιχεί σε δύο τιμές διατομής, την πραγματική και την αντίστοιχη τυποποιημένη (στήλες 7 και 8). Για παράδειγμα: Η επιλογή B αντιστοιχεί σε μήκος 0.4 km και διατομή 10 mm² ή μήκος 0.5 km και διατομή 12.5 mm² ή μήκος 0.6 km και διατομή 15 mm² κλπ. Πάντα όμως ο λόγος *μήκος/διατομή γραμμής* θα είναι ίδιος. Αν για το κάθε τμήμα γραμμής επιλεγεί κάποια από τις διατομές που περιλαμβάνονται στον πίνακα, τότε το μήκος του μπορεί να επιλεγεί μεταξύ των τιμών που αντιστοιχούν στις επιλογές A έως F για αυτή τη διατομή. Αν θεωρήσουμε διαφορετική διατομή, τότε τα ίδια σύμβολα αντιστοιχούν σε άλλα μήκη.

Οι **φασικές πτώσεις τάσης** $V_A - V_1$, $V_A - V_2, \dots, V_A - V_5$, όπου V_1, V_2, \dots, V_5 οι φασικές τάσεις στα σημεία 1, 2, ..., 5 και V_A η φασική τάση του σταθμού A, είναι δυνατό να μετρηθούν μέσω ψηφιακού βολτομέτρου. Από τις πτώσεις τάσης $V_A - V_1, V_A - V_2, \dots, V_A - V_5$ μπορούμε ακολούθως να βρούμε την τάση τροφοδοσίας σε κάθε σημείο της γραμμής. Αν $V_A - V_B > 2 \text{ KV}$, τότε ηχεί συναγερμός για να επισημανθεί ότι το κύκλωμα στην περίπτωση αυτή δεν αντιστοιχεί σε πραγματικό.

Όργανα-συσκευές-υλικά:

Εξομοιωτής τριφασικής γραμμής διανομής 20 KV - 6 MVA, DI-200/KV-SLD.

Πειραματική διαδικασία:

α) Θα τροφοδοτήσουμε τη γραμμή από τον ΥΣ Α (20 KV πολική τάση). Οπότε, με τον ΥΣ Β να είναι OFF και με τα τέσσερα φορτία ON:

- Στον πίνακα 5 καταγράφουμε τις φασικές πτώσεις τάσης $V_A - V_1, V_A - V_2, \dots, V_A - V_5$.
- Εντοπίζουμε τον δυσμενέστερο καταναλωτή.
- Βρίσκουμε την τάση στα άκρα του δυσμενέστερου καταναλωτή.

β) Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία, αλλά τώρα με απενεργοποιημένο τον ΥΣ Α, η τροφοδότηση θα γίνει από τον ΥΣ Β (B ON, A OFF).

γ) Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία, αλλά τώρα η τροφοδότηση θα γίνει και από τους δύο υποσταθμούς, δηλαδή και από τον ΥΣ Α και από τον ΥΣ Β με την ίδια τάση 20 KV.

Υποσταθμός	$V_A - V_1$ (V)	$V_A - V_2$ (V)	$V_A - V_3$ (V)	$V_A - V_4$ (V)	$V_A - V_5$ (V)	Δυσμενέστερος καταναλωτής	Τάση (V)
Τροφοδότηση από ΥΣ Α (20 KV)							
Τροφοδότηση από ΥΣ Β (20 KV)							
Τροφοδότηση από ΥΣ Α και ΥΣ Β (20 KV)							

Πίνακας 6

Βιβλιογραφία

- [1] Η. Λόης, “Εργαστηριακές ασκήσεις στο μάθημα Μεταφορά & Διανομή Η. Ε.”, Α Μέρος, 2004.
- [2] Π. Β. Μαλατέστας, “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2014.
- [3] Β. Ν. Ξανθός, “Παραγωγή – Μεταφορά – Διανομή Μέτρηση και Εξοικονόμηση Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Ζήτη, Β΄ Έκδοση, 2003.
- [4] Λ. Οικονόμου, Γ. Φώτης, “Εισαγωγή στις Υψηλές Τάσεις”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η Έκδοση, 2012.
- [5] Παντελής Β. Μαλατέστας, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.
- [6] Stephen J. Chapman, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Εκδόσεις Τζιόλα, 4^η Έκδοση, 2010.